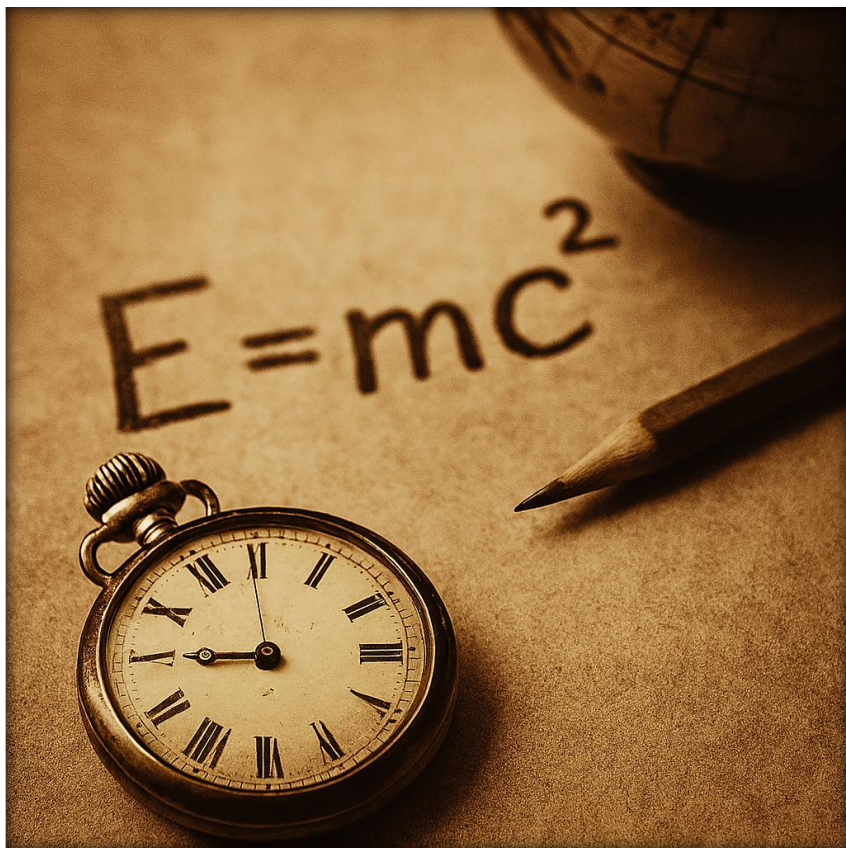


# ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA RELATIVIDAD



*Alejandro Valderrama*

Gemini   
Chat GPT   
Copilot   
Meta 

# ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA RELATIVIDAD

Autor: A. Valderrama 

© 2025 A. Valderrama. Todos los derechos reservados.

## DESCARGO DE RESPONSABILIDAD



- Los temas desarrollados han sido elaborados de manera original por el Autor para la impartición de algunos cursos de Relatividad de la Facultad de Ciencias, UNAM.
- La información presentada ha sido tomada de múltiples fuentes, algunas referidas en la bibliografía del curso y otras de información disponible en la Internet de *dominio público*.
- Algunos párrafos pueden ser tomados textuales o traducidos, o algunas fotos reproducidas de manera directa o indirecta, en todos los casos se ha realizado un trabajo de recopilación, organización y edición original.
- En ningún momento el realizador pretende adjudicarse la autoría de ninguna de todas las partes componentes de este material didáctico; más, sin embargo, sí la autoría y propiedad de la composición como material didáctico terminado o en desarrollo.

**Declaración Americana de los Derechos y Deberes del Hombre.**

**Artículo 4°. Derecho de libertad investigación, opinión, expresión y difusión.**

- “Toda persona tiene derecho a la libertad de investigación, de opinión y de expresión y difusión del pensamiento por cualquier medio”

-----  
Primera edición. Ciudad de México, 2025.

Prohibida la reproducción total o parcial de esta obra por cualquier medio sin la autorización expresa del autor. Cualquier cita o referencia deberá mencionar la fuente completa.

### **Nota del autor sobre el uso de inteligencia artificial:**

*Este libro fue desarrollado con el apoyo de herramientas de inteligencia artificial —incluyendo ChatGPT, Gemini y Copilot— empleadas como instrumentos de análisis conceptual, redacción técnica y exploración de modelos físicos. Todas las ideas, estructuras y resultados presentados fueron dirigidos, revisados y sintetizados por el autor, quien conserva plena autoría y responsabilidad intelectual sobre la obra.*

Para contacto o correspondencia académica:

✉ [[alecvald@ciencias.unam.mx](mailto:alecvald@ciencias.unam.mx)]

## Prólogo del Autor

La Relatividad (Especial y General) nos obliga a ser conocedores o al menos recordar los aspectos básicos de la Geometría, la Mecánica, la Termodinámica, la Teoría Cinética Molecular, la Óptica y el Electromagnetismo; ya que muchos de sus resultados modifican los axiomas clásicos añadiéndoles nuevas propiedades al establecer conceptos sorprendentes como *la dilatación del tiempo* (el tiempo pasa más lento para los objetos en movimiento rápido), *la contracción de la longitud* (los objetos en movimiento parecen más cortos en su dirección de movimiento) y la famosa ecuación  $E = mc^2$  que relaciona masa y energía.

El presente trabajo está dirigido a estudiantes de licenciatura en su primera aproximación a la Relatividad o a profesores que empiezan a impartir la materia a nivel licenciatura, solo como un complemento. Puede bien servir de preámbulo antes de empezar con los temas de un curso inicial de Relatividad Especial propiamente o servir como una breve referencia histórica de los resultados más importantes del desarrollo de las matemáticas y la física desde su origen hasta principios del siglo XX en que Einstein presentó su Teoría de la Relatividad Especial (publicada en 1905) que describe cómo el espacio y el tiempo se relacionan, especialmente a altas velocidades; y una década después, la Relatividad General que extiende estas ideas para incluir la gravedad y describir cómo la masa y la energía curvan el espacio-tiempo.

Por ser una revisión histórica, es un trabajo inevitablemente incompleto, ya que es imposible relatar la historia de la física en unas cuantas páginas en la que no falten resultados importantes o grandes científicos con aportaciones fundamentales.

Sin embargo, para cruzar el río de la evolución del conocimiento clásico: físico matemático, hemos optado por dar “saltos de rana” en donde cruzamos ese río apoyándonos de las “piedras” más sobresalientes para llegar al otro lado: la Física Moderna.



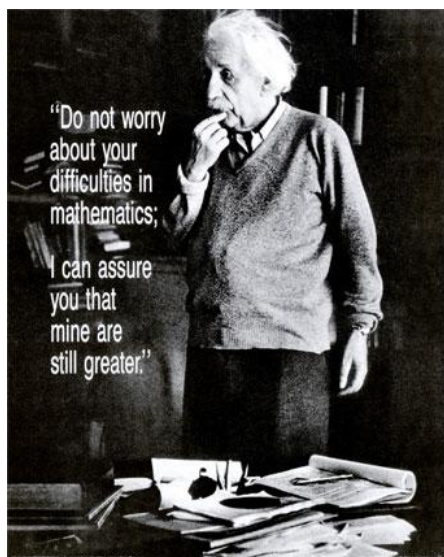
El lector podrá añadir en sus notas los elementos que le parezcan faltantes para lograr mayor consistencia en esta breve revisión.

*"El hecho de que pueda observar una cosa o no, depende de la teoría que esté usando. Es la Teoría la que decide que puede ser observado".*

**EINSTEIN**

# Contenido

|                                                |           |
|------------------------------------------------|-----------|
| <b>INTRODUCCIÓN .....</b>                      | <b>5</b>  |
| CONCEPCIÓN ANTIGUA DEL ESPACIO .....           | 8         |
| CONCEPCIÓN ANTIGUA DEL TIEMPO.....             | 8         |
| PERIODO MEDIEVAL .....                         | 16        |
| <b>CLASIFICACIÓN DE LA FÍSICA CLÁSICA.....</b> | <b>18</b> |
| MECÁNICA CLÁSICA.....                          | 19        |
| TERMODINÁMICA.....                             | 25        |
| TEORÍA CINÉTICA MOLECULAR.....                 | 27        |
| ÓPTICA .....                                   | 28        |
| TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA.....                   | 30        |
| <b>FÍSICA MODERNA.....</b>                     | <b>41</b> |
| <b>ESCRITOS DE EINSTEIN DE 1900 A1909.....</b> | <b>48</b> |
| LISTA DE TRABAJOS .....                        | 48        |
| <b>ANEXO FOTOGRÁFICO.....</b>                  | <b>54</b> |



# ANTECEDENTES HISTÓRICOS DE LA RELATIVIDAD

## INTRODUCCIÓN

Se dice que la Relatividad (Especial y General) junto con la Mecánica Cuántica constituyen los pilares de la Física Moderna. Para entenderlas mejor, de manera epistemológica (según la evolución del conocimiento), es necesario conocer al menos un poco la historia de la Física Clásica, cuyos fundamentos se remontan al Mundo Antiguo, que a su vez tiene sus cimientos en la prehistoria y el desarrollo antropológico y social de la humanidad.

La necesidad de medir el tiempo y comprender la sucesión entre el día y la noche está enraizada en las relaciones socioculturales de la edad de piedra de hace, unos 12 mil años, posiblemente en la transición de pequeños grupos de cazadores a comunidades agrícolas.

Los movimientos estacionales del Sol y la Luna, se puede decir que, desde siempre, han sido conocidos y determinantes para toda clase de actividades de relación, descanso, supervivencia y provisión de recursos. Además de que su periodicidad diaria rige el ciclo circadiano o metabólico de nuestra y casi todas las especies vivas.



Stonehenge (al sur de Inglaterra)  
[3000-2000]

**NOTA:** Sobre el desarrollo temprano de la astronomía y su impacto en las sociedades humanas, la mejor referencia es “La Revolución Copernicana” de Thomas S. Kuhn.

La dificultad para predecir y explicar los movimientos de los astros constituyó, desde la prehistoria, el gran reto para la humanidad que dio lugar a la astronomía que con su desarrollo a ido cambiando nuestra manera de entender el Mundo y modificado el *paradigma existencial*.



Analema Solar: cambio de posición  
a la misma hora durante el año.

Por simplicidad, nosotros situaremos los orígenes de la Física Clásica formalmente en Grecia, en la época de sus grandes filósofos.

Aunque reconocemos que muchas de las síntesis griegas a su vez tienen un antecedente egipcio, macedonio, y hasta de Sumeria y Mesopotamia.

De los Babilonios, una de las culturas mesopotámicas de la antigüedad, se sabe que ya conocían la redondez de la Tierra por haber observado su sombra semicircular sobre la faz de la Luna desde miles de años atrás, en la época de la prosperidad del Mercado de Babilonia hace unos 3,500 años.

También se les atribuye un sistema eficiente de contar, basado en el sistema sexagesimal (con base 60) por lo que se les hace responsables del generalizado uso de las divisiones en 60 partes de: *grados, horas y minutos*.

Y que calcularon que el perímetro del hexágono era 6 veces el radio del círculo circunscrito con lo que estimaron  $\pi = 3.125$ , entre otros importantes avances en el lenguaje de la geometría y los números.

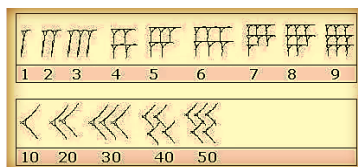
La astronomía babilónica sirvió de base para el desarrollo posterior de la astronomía griega y helenística, pero a diferencia, los griegos resultaron más “teóricos”: Se preguntaban más por las causas primeras y proponían modelos para intentar explicar el funcionamiento de la naturaleza.

Con la consolidación del uso de los números de contar y medir, junto con la astronomía como métrica básica para los ciclos de la agricultura y la vida en comunidad, en el Mundo Antiguo, la humanidad fue desarrollando de manera empírica la aritmética práctica y la geometría descriptiva como fundamento para el ulterior desarrollo de las matemáticas formales.

El uso de la aritmética (y bases de álgebra) aplicados a la geometría, como abstracción de la observación astronómica terminan por establecer los conceptos de *punto* (tal vez, representando) y el de *línea recta* (como la distancia abstracta “más corta” entre 2 de ellas).



Fases de la Luna



Números Babilónicos

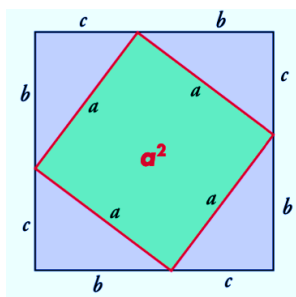


Tablilla de barro babilónica con anotaciones.



Constelación Casiopaea

Pero quizá el gran salto se puede atribuir a los egipcios, constructores de pirámides y grandes monumentos que lograron establecer *ecuaciones* entre cantidades diversas y de extensión espacial: longitudes, áreas y volúmenes; de donde Pitágoras logra sintetizar su famoso **Teorema**:



*La suma del cuadrado de la longitud de los lados “rectos” de un triángulo es igual al cuadrado de la diagonal.*

$$(b + c)^2 = a^2 + 4 \frac{b * c}{2}$$

Y como la anterior, son innumerables las contribuciones de los diferentes pueblos, sintetizadas como “piezas del rompecabezas” del conocimiento humano sobre la naturaleza, a nombre de pensadores destacados, que han dejado constancia de sus síntesis de conocimiento, en descubrimientos e invenciones para el desarrollo y creación de herramientas de lenguaje y metalenguaje (matemáticas) para la descripción y estudio del Universo.

Ahora bien, en un afán de ser prácticos y no exhaustivos, en estos apuntes de Antecedentes de la Relatividad, pondremos atención a un buen conjunto de contribuciones destacadas y significativas, tratando de no perder de vista sus implicaciones en las definiciones o interpretaciones de espacio y tiempo, tanto de los filósofos de la antigüedad como del propio Newton, de Leibnitz, y hasta Einstein.

Además, sugerimos investigar otras definiciones, de filósofos y matemáticos; así como tener en consideración la manera en la que se interpreta el tiempo, en la vida cotidiana, en la mecánica celeste y en la termodinámica, y revisar el concepto de "flecha del tiempo", popularizado por Arthur Eddington hasta 1927.

A continuación, haremos una revisión epistemológica mencionando brevemente ejemplos de filósofos y científicos cuyas aportaciones han mejorado y desarrollado el saber sobre la naturaleza a través de las matemáticas y la física perdiendo de vista por ahora, las otras áreas del conocimiento. Recomendamos ampliamente conocer un poco más a detalle las biografías y contribuciones de alguna selección de ellos, aprovechando tanto la información disponible en la Internet como leyendo directamente a algunos de sus biógrafos con la finalidad de entender de una manera más familiar el proceso de discutir conceptos, ponerlos a prueba y desarrollarlos una y otra vez para ir pasando más y más pruebas... Solo mediante la correcta predicción de los fenómenos la ciencia avanza y se valida. Las explicaciones son un buen camino, pero solo las demostraciones, y pruebas sobre su reproducibilidad y predictibilidad establecen los hechos científicos.

## CONCEPCIÓN ANTIGUA DEL ESPACIO

En la antigüedad sobre el concepto de *espacio*, existía una "guerra intelectual" entre tres visiones principales:

**1. El Espacio como "Lugar" (Topos):** Esta fue la visión dominante durante siglos. Para Aristóteles (y sus seguidores en el periodo -300 a 300), el espacio vacío no existía.

*"El espacio es el límite interior del cuerpo que envuelve a otro cuerpo"*

El universo es un *Plenum* (está lleno). No existe el vacío. El movimiento es posible porque las cosas se desplazan como un fluido (*antiperístasis*): cuando un objeto se mueve hacia adelante, el aire debe rodearlo y llenar el hueco que deja atrás instantáneamente.

**2. El Espacio como "Vacío" (Kenon):** Los atomistas como Demócrito, y más tarde Epicuro y Lucrecio, defendían lo contrario.

*"Si todo está lleno, nada se puede mover".*

Para que haya movimiento, tiene que haber "nada" (*no-ser*) entre las cosas.

**3. El Espacio Geométrico:** Mientras los filósofos discutían si el vacío existía, los matemáticos como Euclides y Arquímedes inventaron el *espacio abstracto*. Para hacer geometría, se necesitaba un espacio homogéneo, plano e isotrópico (igual en todas direcciones).

Ya no importaba si estaba hecho de aire o de vacío; solo que fuera mensurable. Este es el antepasado directo de la geometría analítica.

**4. Una mezcla curiosa:** Los estoicos (muy populares en Roma, años 0-200) intentaron unificar las diferentes concepciones sobre el espacio; dijeron que: *dentro* del mundo todo está lleno (como Aristóteles), pero *fuera* del mundo hay un vacío infinito (*extracosmos*).

Imaginaban el universo como una isla de materia flotando en un océano de nada infinita.

## CONCEPCIÓN ANTIGUA DEL TIEMPO

Al igual que con el espacio, la concepción del tiempo entre el -300 y el 300 se debatía entre diferentes posturas:

**1. El Tiempo como "Número del Movimiento":** Para Aristóteles (y la mayoría de los astrónomos de la época), el tiempo no fluye por sí solo.

*"El tiempo es la medida del movimiento según el antes y el después".*

Así que, si nada se mueve, no hay tiempo.

El "reloj" maestro no era un número abstracto  $t$ , sino el giro físico de la esfera de las estrellas fijas. El tiempo era circular y perfecto.

**2. El Tiempo como "Accidente":** Los atomistas (Lucrecio, Epicuro) tenían una visión muy moderna. Para ellos el tiempo no es una "cosa" es un *epifenómeno*, los átomos solo tienen forma, peso y movimiento. El "tiempo" es solo la sensación que tenemos al ver que los átomos cambian de lugar.

**3. El Instante Evanesciente:** Es quizás la visión más profunda y angustiante, desarrollada por los Estoicos Crisipo y Séneca.

El pasado ya no existe. El futuro aún no existe. Por lo tanto, el tiempo no existe, solo existe el "ahora", como un punto infinitamente delgado (un punto geométrico sin duración).

Así pues, definían el tiempo como una "extensión del movimiento", pero vivían obsesionados con la realidad única del presente instantáneo.

**4. La Dualidad: Chronos vs. Aiôn:** Hacia el final del periodo [-200–300] los neoplatónicos con Plotino, establecieron una distinción mística:

- **Chronos:** Es el tiempo secuencial, el que devora las cosas, el paso del 1 al 2 al 3. Es el tiempo de la materia corruptible.
- **Aiôn (Eón):** Es el tiempo de la eternidad, el "presente eterno" donde viven las leyes matemáticas y las ideas puras.

Y, por otro lado, más allá del debate filosófico, a nivel el práctico, en la cotidianidad del Mundo Antiguo se utilizaban diferentes elementos para medir, tanto el espacio en sus tres dimensiones, lo cual era indispensable para la arquitectura, la navegación o la guerra y el tiempo que era regido por los calendarios.

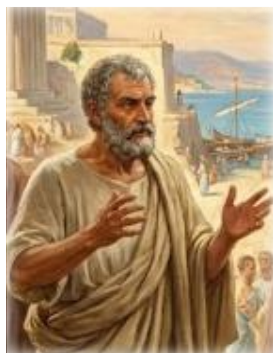
Las unidades de medida de la antigua Grecia se conformaron, en general, de acuerdo con las Unidades de medida en el Antiguo Egipto, y constituyeron luego la base de las Unidades de medida de la antigua Roma.

Para medir distancias cortas usaban el pie, el dedo, el codo; y para distancias grandes se contaban los pasos o bien se usaba principios de geometría y trigonometría para las estimaciones de alturas, y hasta distancias a cuerpos celestes, como demostró Aristarco de Samos con el Sol y la Luna.

Para medir el tiempo se tenían relojes de arena, de agua (clepsidras que goteaban a un ritmo constante), de Sol y algunos otros métodos para dar cuenta de diferentes intervalos; y desde luego los calendarios astronómicos que marcaban los ciclos lunares, de cultivo, estacionales y políticos.

## Nombre

## Contribución



**TALES DE MILETO**  
[624–546]

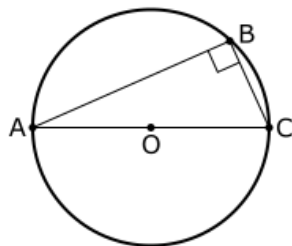
Vivió y murió en Mileto, polis griega de la costa Jonia (hoy en Turquía).

Propuso estudiar los fenómenos naturales que observamos tratando de explicarlos en términos de teorías e hipótesis de materiales interaccionando de acuerdo con ciertas leyes naturales por conocer, y sin tener que referirse a la voluntad de los dioses para explicar los fenómenos, sino proponiendo un debate público, racional y crítico, en que unas ideas pudieran imponerse a otras a través de la evidencia y el convencimiento.

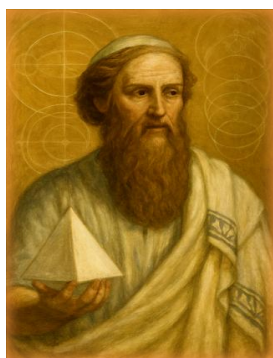
Se le atribuyen dos teoremas con métodos para la construcción de triángulos semejantes:

**Teorema 1º:** Si en un triángulo se traza una línea paralela a cualquiera de sus lados, se obtiene un triángulo que es semejante al triángulo dado.

**Teorema 2º:** Sea **B** un punto de la circunferencia de diámetro **AC** y centro "**O**", distinto de **A** y de **C**. Entonces, el triángulo **ABC** es un triángulo rectángulo donde  $\angle ABC = 90^\circ$ .



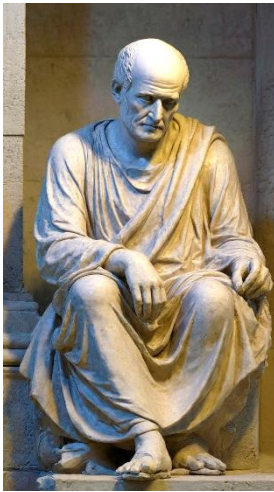
Segundo teorema de Tales de Mileto



**PITÁGORAS DE SAMOS**  
 [570-490]

Estableció el significado funcional de los números en el mundo objetivo y en la música, además del teorema que lleva su nombre. Fue fundador de una escuela de matemáticas y filosofía que logró muchos adeptos.

Hoy en día no se distinguen bien sus escritos de los de sus discípulos por lo que más que el personaje, fue la escuela pitagórica la que, tomando conocimientos de Mesopotamia, Egipto y la India, constituyeron un lenguaje matemático e interpretación de la realidad que influyó en toda la filosofía griega.



**ARISTÓTELES**  
[384-322]

Es considerado junto a Platón (del que era discípulo), el padre de la filosofía occidental.

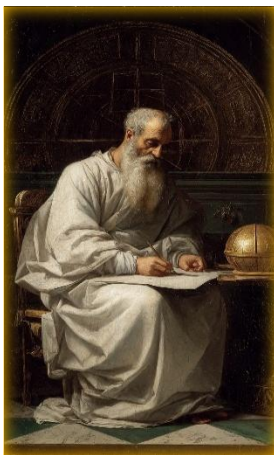
A diferencia del platonismo, que es idealista, Aristóteles desarrolló una filosofía donde la fuente del conocimiento es la experiencia. Sus ideas han ejercido una enorme influencia sobre la historia intelectual de Occidente por más de dos milenios.

Fundador de la lógica y de la biología, también es reconocido como el padre de la: ciencia política y el derecho natural, la zoología, embriología, retórica, psicología, teleología y de la meteorología.

En física simplemente la mayoría de sus ideas estuvieron equivocadas, pero sentó las bases para una discusión racional sobre el movimiento.

***“Los cuerpos dejan de moverse si la fuerza que les imprime el movimiento cesa”.***

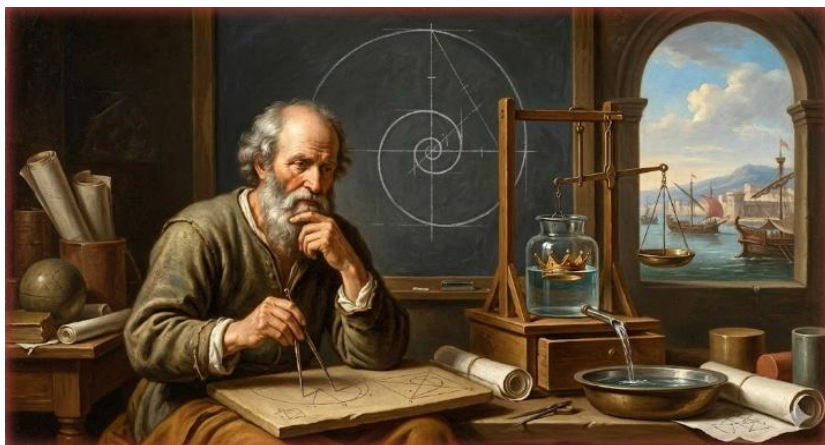
Algunas de sus ideas, que fueron novedosas para la filosofía de su tiempo, hoy forman parte del sentido común de muchas personas.



**EUCLIDES**  
[325-265]

Establece una geometría para el espacio basada en cinco postulados:

1. Dos puntos distintos cualesquiera determinan un segmento de recta.
2. Un segmento de recta se puede extender indefinidamente en una línea recta.
3. Se puede trazar una circunferencia dados un centro y un radio cualquiera.
4. Todos los ángulos rectos son iguales entre sí.
5. Postulado de las paralelas: Si una línea recta corta a otras dos, de manera que la suma de los dos ángulos interiores del mismo lado sea menor que dos rectos, las otras dos rectas se cortan, al prolongarlas, por el lado en el que están los ángulos menores que dos rectos.



### ARQUÍMEDES DE SIRACUSA

[287-212]

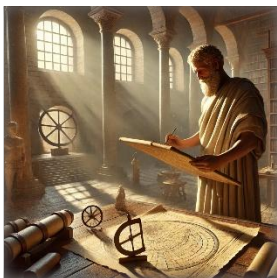
Fue un eminente matemático, físico, ingeniero, inventor y astrónomo de la antigua Grecia, considerado uno de los científicos más importantes de la Antigüedad. Entre sus aportaciones se tienen:

- **Principio de Flotación:** establece que todo cuerpo sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical hacia arriba igual al peso del volumen del fluido que desaloja.

Anecdóticamente se cuenta que al descubrir este principio en la bañera, salió corriendo desnudo por las calles gritando *¡Eureka!*, «*¡Lo he encontrado!*»

- **Principio de la Palanca:** la resumió con la célebre frase: "Dadme un punto de apoyo y moveré el mundo".
- **Matemáticas y Cálculo:** Realizó importantes avances en geometría, incluyendo el cálculo del área de figuras curvas y el volumen de sólidos. Utilizó el método de exhaustión para aproximar el valor del número pi ( $\pi$ ) con gran precisión para su época, inscribiendo y circunscribiendo polígonos en un círculo.
- **Invencciones:** Diseñó numerosas máquinas, como su tornillo para elevar agua y sistemas de poleas para mover objetos pesados.

La biografía de Arquímedes vale la pena estudiarse con mas detenimiento ya que sus historias y anécdotas hacen de la física algo más cercano a la ingeniería por sus cualidades de utilidad práctica, y nos instruyen en la importancia de hacer física aplicada.

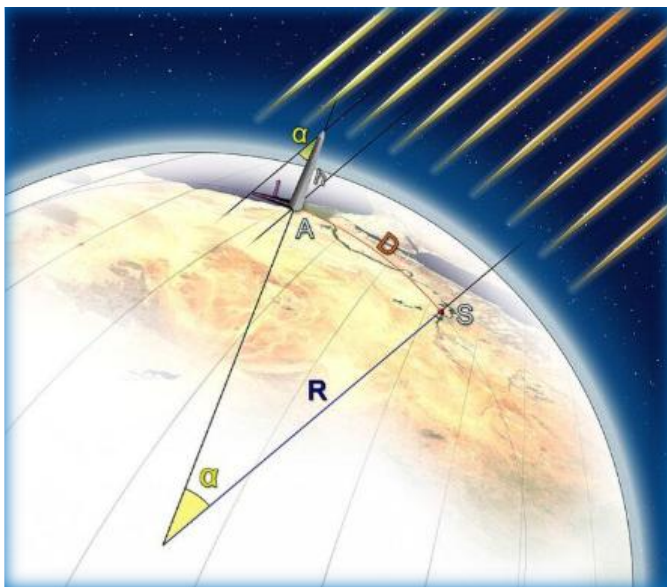


**ERATÓSTENES DE CIRENE**  
[276-194]

Concibió por primera vez la geografía como una disciplina sistemática, desarrollando una terminología que todavía se utiliza en la actualidad, y creó el primer mapamundi, usando paralelos y meridianos basados en el conocimiento geográfico de su época.

Calculó la geometría esférica de la Tierra usando triángulos y la suposición de que el Sol está tan lejos que los rayos solares que llegan son paralelos entre sí.

Eratóstenes sabía, gracias a lecturas que había realizado en Alejandría, que durante el solsticio de verano en Siena (actual Asuán, Egipto), a mediodía el Sol estaba justo sobre la cabeza, en el *cénit*. Es decir, los objetos verticales no reflejaban sombra e incluso la luz alumbraba el fondo de los pozos.



Entonces, midió el ángulo de elevación durante el mismo período y a la misma hora en Alejandría con la ayuda de un *gnomon*, una estructura vertical que servía como reloj solar.

También midió el largo de la sombra en el suelo. Con esos datos (longitud de la sombra y longitud de la vara), Eratóstenes calculó el ángulo de los rayos solares en 1/50 parte de una circunferencia. Sin embargo, asumió que Siena se encontraba justo sobre el Trópico de Cáncer, un dato que era incorrecto.



**CLAUDIO PTOLOMEIO**  
[90-168]

Astrónomo y matemático griego egipcio del siglo II, conocido por su modelo geocéntrico del universo y sus trabajos en cartografía, famoso por sus obras como el "Almagesto" y la "Geografía".

Postuló que la Tierra es el centro inmóvil del universo y que todos los demás cuerpos celestes, incluido el Sol, giran a su alrededor, en un sistema unificado en el que cada cuerpo celeste está unido a su propia esfera y el conjunto de esferas está anidado de modo que se extiende sin espacios desde la Tierra hasta la esfera celeste.

Este sistema, sustituyó al sistema de Aristóteles y fue tan influyente que logró dominar el pensamiento científico, religioso y filosófico del mundo occidental y árabe durante un periodo extraordinariamente largo, de más de mil cuatrocientos años, antes de ser desplazado por la revolución copernicana.

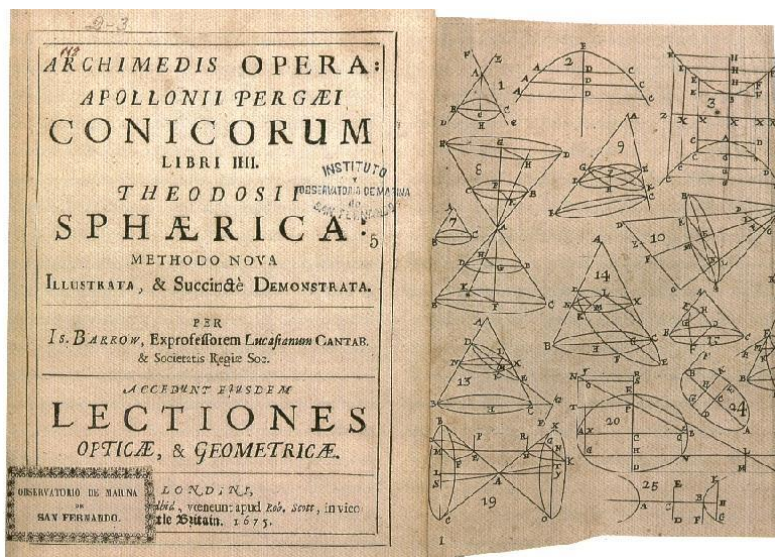


El sistema geocéntrico de Ptolomeo explicaba los movimientos de cada planeta con dos círculos principales:

- **Deferente:** La trayectoria circular más grande, cuyo centro estaba cerca (pero no siempre exactamente en) la Tierra.
- **Epiciclo:** Una trayectoria circular más pequeña sobre la cual se movía el planeta, y cuyo centro se desplazaba a lo largo del deferente.

En total, utilizó aproximadamente 12 círculos (6 deferentes y 6 epiciclos) en su modelo estándar para el Sol y los cinco planetas conocidos en ese momento (Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno), además de los círculos para la Luna y las estrellas fijas.

A medida que se realizaban observaciones más precisas a lo largo del tiempo, se fueron añadiendo círculos adicionales (a veces múltiples epiciclos anidados) y otros conceptos como el ecuante (un punto excéntrico desde donde el movimiento parecía uniforme) para refinar el modelo y ajustarlo a los datos empíricos, aumentando la complejidad del sistema original.



### APOLONIO DE PERGA [262-190]

Era conocido como '*el gran geómetra*'. Sabemos poco de su vida, pero sus trabajos tuvieron una gran influencia en el desarrollo de las matemáticas, en particular su famoso libro Las cónicas donde introdujo términos tan familiares hoy en día como parábola, elipse e hipérbola.



### HIPATIA DE ALEJANDRÍA [355-415]

Fue una destacada filósofa neoplatónica, matemática y astrónoma que vivió en Egipto, entonces parte del Imperio Romano de Oriente. Es considerada la primera mujer matemática de la que se tiene registro detallado y se convirtió en un símbolo de la sabiduría y la razón.

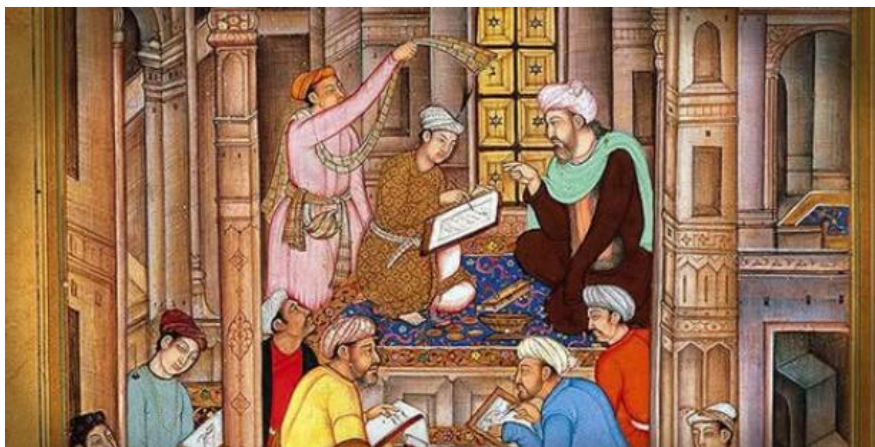
Sus aportaciones incluyen la creación de instrumentos científicos como el astrolabio y el hidrómetro, así como comentarios sobre obras matemáticas de Diofanto y Apolonio, y la construcción de un planisferio para cartografiar los cielos.

Es célebre por su trabajo sobre las secciones cónicas, que facilitó la comprensión de las elipses, hipérbolas y parábolas; y su obra sentó las bases para futuros descubrimientos en geometría y astronomía.

## PERIODO MEDIEVAL

El periodo del siglo IV al XV, correspondiente a la Edad Media, se caracterizó por un marcado contraste en el desarrollo de la ciencia y las matemáticas. Mientras que en Europa Occidental hubo un retroceso inicial, el mundo islámico experimentó una Edad de Oro, preservando y expandiendo el conocimiento antiguo, y de civilizaciones como la India y China que también hicieron aportaciones significativas.

Los matemáticos árabes en la Edad Media introdujeron los números *arábigos*, incluyendo el cero “*sefr*” y generalizaron el uso de las cifras (uso del sistema de numeración posicional decimal), en vez de cocientes. Se les considera fundadores de la aritmética de la vida cotidiana, y a ellos debemos el álgebra como ciencia exacta.



También desarrollaron la trigonometría al introducir los conceptos de seno y coseno (Al Batani) y la geometría por sus aplicaciones astronómicas.

Algunos de los más destacados matemáticos árabes incluyen a:

- **Al-Juarismi [780-850]:** Es considerado el "padre del álgebra" por su obra “*Kitāb al-Jabr wa al-Muqābala*”, de donde proviene la palabra "álgebra". Desarrolló el sistema de resolución de ecuaciones lineales y cuadráticas e introdujo en Europa el sistema de numeración decimal hindú, incluyendo el cero, a través de su libro “*El libro de la suma y de la resta, según el cálculo indio*”.
- **Thabit ibn Qurra [826-901]:** Realizó trabajos teóricos en geometría y teoría de números e hizo aportes en astronomía y fue uno de los traductores más reconocidos de obras griegas al árabe.

➤ **Alhacén [965-1040]:** Realizó importantes contribuciones a la óptica con su obra “*Kitāb fi al-Manāẓir*” y fue uno de los primeros en resolver geométricamente ecuaciones de tercer grado; también hizo aportaciones a la teoría de números y la geometría elemental.

En cambio, las Matemáticas en la Europa medieval, a la entrada del Renacimiento, se reducía básicamente al texto fundamental de los Elementos de Euclides, más algunas recuperaciones de varios libros griegos, como las Cónicas de Apolonio, y aportaciones que la cultura árabe había hecho y recopilado, aunque sin lograr una difusión muy generalizada.

Al comenzar el siglo XV la Geometría ya alcanzaba un desarrollo superior a la Aritmética, en parte al predominio que durante el medioevo tuvo el empleo de los números romanos (en los que faltaba el cero y las reglas de operación no eran claras ni estaban bien definidas).

Con la publicación de los primeros tratados de Aritmética, surgió un lenguaje propio no abstracto que introdujo nuevos simbolismos, lo que favoreció su desarrollo y utilidad para toda clase de cálculos.

Florencia y Urbino fueron algunos de los centros de los que partió el resurgimiento y estudio de las matemáticas a partir de aquellos textos antiguos y bizantinos, muchos de ellos preservados, traducidos, y reescritos por los árabes.

Lo que llevo a que las matemáticas se hicieran importantes fue el éxito de sus aplicaciones prácticas en forma de logros espectaculares de la arquitectura y la ingeniería.

En el Renacimiento se desarrolló el álgebra: a partir de una especie de arte de mercaderes para resolver problemas, a algo parecido a la ciencia de resolver ecuaciones, lo cual fue un proceso lento desde el siglo X hasta el XIII.



La catedral de Florencia posee la mayor cúpula de ladrillo del mundo realizada por Filippo Brunelleschi (1436).

El estudio práctico de los métodos de cálculo indo-arábigos, del siglo XV derivó en un arte mucho mayor de resolver problemas, conocido como “el arte analítico”. Los libros que trataban de este arte, escritos aún a mano, comenzaron a usar abreviaturas y símbolos, como los numerales indo-arábigos, para facilitar los cálculos. Las versiones impresas de estos textos comienzan a aparecer con el nuevo siglo.

# CLASIFICACIÓN DE LA FÍSICA CLÁSICA

La Física Clásica es la ciencia fundamental para describir y explicar los fenómenos naturales percibidos cotidianamente en términos matemáticos. Se fue desarrollando desde lo más simple hasta lo más complejo y ha incorporado el “*método científico*” para el estudio de los fenómenos *físicos*, esos en los que la materia interacciona sin cambiar su composición, en cuyo caso aplica la Química que precisamente estudia los cambios de composición y estado de la materia.

El método científico, para la física se puede resumir en: 1) Observación. 2) Planteamiento de un Problema. 3) Formulación de una Hipótesis. 4) Experimentación, que trata de controlar las propiedades naturales y sus interacciones para “reproducir” los fenómenos y de esa manera encontrar las relaciones entre propiedades y variables asociadas que rigen el comportamiento fenomenológico, mediante, 5) El Análisis de Resultados y 6) La Conclusión.

Y no es del todo rígido ya que puede adaptarse a diversos casos de estudio. Por ejemplo, en astronomía la observación suele desplazar a la experimentación; o en el caso de la investigación teórica la hipótesis puede sostenerse argumentativamente y desarrollarse para llevarnos de los estados iniciales de un sistema que cambia, directamente a resultados o explicaciones de los fenómenos naturales sin observar su desarrollo o experimentar de entrada.

La importancia del método científico no solo radica en su eficacia para el estudio y descripción de la naturaleza, también nos permite lograr acuerdos bien establecidos en la comunidad científica sin que por ello se pierda la riqueza de todas aquellas ideas que siendo coherentes y pudiendo aportar nuevos o mejores resultados, no se hayan comprobado aun, y formen parte de la discusión científica.

La Física Clásica da comienzo propiamente con la revolución de Copérnico como el estudio de la geometría de los movimientos astronómicos y del movimiento en general con base en conocimientos prácticos o empíricos, a los que se fueron añadiendo problemas de diferente índole que repercutieron en que sus diferentes áreas de estudio se fueran ramificando:



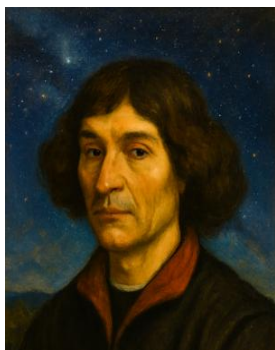
Máquinas simples medievales

## MECÁNICA CLÁSICA

La mecánica clásica o newtoniana trata del movimiento y sus causas, su desarrollo ha permitido entender mejor el movimiento planetario, y describir con precisión prácticamente cualquier tipo de movimiento; lo que facilitó a la humanidad la creación de máquinas simples usando los principios matemáticos en la mecánica del movimiento.

### Nombre

### Contribución



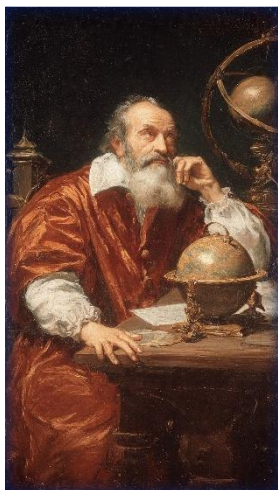
**NICOLÁS COPÉRNICO**



[1473-1543]

Matemático, astrónomo, médico, erudito, traductor, gobernador, diplomático y economista del Reino de Polonia, formuló la teoría heliocéntrica del Sistema Solar, concebida por Aristarco de Samos.

Su libro, publicado en el año de su muerte en 1543, *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (Sobre las revoluciones de las esferas celestes) suele ser considerado como el punto inicial o fundador de la astronomía moderna, además de ser una pieza clave en lo que se llamó la *Revolución Científica* en la época del Renacimiento.



**GALILEO GALILEI**



[1564-1642]

Considerado «padre de la ciencia moderna» fue el primero que usó la experimentación sistemática para construir las teorías físicas.

Despojó del carácter especulativo a la ciencia que le había impreso la escolástica aristotélica.

Estableció el Principio de la Inercia, creó el primer telescopio, observó los cráteres de la Luna, las fases de Venus, los anillos de Saturno y los satélites de Júpiter.

Fue constructor de telescopios usando lentes, relojes usando péndulos y termómetros usando el principio de Arquímedes y la relación entre la temperatura y la densidad de un líquido.

Se dice que intencionalmente retó a la Iglesia para lograr fama y dar a conocer sus ideas.



**RENÉ DESCARTES**  
 [1596-1650]

Filósofo, matemático y físico francés, es considerado el padre de la filosofía moderna y una figura clave en la Revolución Científica.

Es famoso por su enfoque racionalista, su método de duda metódica y su máxima: "*Cogito, ergo sum*" ("*Pienso, luego existo*").

Desarrolló la geometría cartesiana o analítica, que utiliza el álgebra para describir la geometría. Descartes inventó la convención de representar incógnitas en las ecuaciones entre muchas otras contribuciones.

En 1637 publicó el Discurso del método para dirigir bien la razón y hallar la verdad en las ciencias, seguido de tres ensayos científicos: La Geometría, Dióptrica y Los meteoros.



**JOHANNES KEPLER**  
 [1571-1630]

Astrónomo, matemático y astrólogo alemán, conocido por sus tres leyes del movimiento planetario en su órbita alrededor del Sol:

*1ª Órbitas elípticas.*

*2ª Barrido de Áreas iguales en tiempos iguales.*

*3ª  $T^2 = (4\pi^2/GM_{\odot})a^3$ .*

Estas leyes sentaron las bases para la teoría de la gravitación universal de Isaac Newton. Fue colaborador de Tycho Brahe, a quien sustituyó, tras su muerte, como matemático imperial de Rodolfo II. Hizo avances significativos en el estudio de la óptica, describiendo cómo se forman las imágenes en el ojo humano y desarrollando un nuevo y mejorado telescopio refractor (el telescopio kepleriano).

Fue capaz de predecir satisfactoriamente el tránsito de Venus del año 1631 con lo que su teoría quedó confirmada. Afirmó que "las mareas venían motivadas por una atracción que la luna ejercía sobre los mares..."

***La observación debe primar sobre las suposiciones.***



**CHRISTIAAN HUYGENS**  
 [1629-1695]

Fue un eminente científico, matemático, astrónomo e inventor neerlandés.

Realizó contribuciones fundamentales en campos como la óptica, la dinámica y la astronomía.

Uso el principio de Galileo: *el periodo de un péndulo es el mismo, cualquiera que sea la amplitud de la oscilación* para construir el reloj de péndulo.

Su interés en la observación como fuente del conocimiento lo condujo a la construcción y uso a fondo del telescopio, realizó un sinnúmero de descubrimientos de gran trascendencia para el desarrollo de la astronomía y la mecánica y, en particular, para el establecimiento definitivo del modelo de Copérnico del Sistema Solar.



**GOTTFRIED LEIBNIZ**  
 [1646-1716]

Reconocido como uno de los grandes pensadores de los siglos XVII y XVIII y, a menudo, llamado el "último genio universal".

*"Universos con cuerpos en posiciones absolutas, diferentes, pero: iguales en sus posiciones relativas, son indistinguibles"*.

Desarrolló el cálculo infinitesimal y su notación que es la que se emplea actualmente.

$$df/dx, \int x dx$$

Inventó el sistema binario y construyó la primera calculadora mecánica que podía realizar sumas, restas, multiplicar y dividir.

Su concepto *vis viva* sentó las bases para la definición de *energía cinética*.

También es considerado un fundador de la lógica simbólica moderna, anticipando la lógica matemática y la filosofía analítica del siglo XX.



ISAAC NEWTON  
 [1642-1727]

Autor de los *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*, estableció la ley de la gravitación universal:

$$F = - \frac{GMm}{r^2}$$

y las bases de la Mecánica Clásica mediante las leyes que llevan su nombre.

***“El espacio y el tiempo son absolutos e independientes de los cuerpos que existan en ellos”.***

Además, desarrolló una ley de convección térmica que describe la tasa de enfriamiento de los objetos expuestos al aire; y realizó estudios sobre la velocidad del sonido en el aire.

También fue pionero de la mecánica de fluidos, estableciendo una ley sobre la viscosidad. Entre sus otros descubrimientos científicos destacan los trabajos sobre la naturaleza de la luz y la óptica y el desarrollo del cálculo matemático.

La importancia de Newton para la física radica en una correcta abstracción de las premisas del *Movimiento de los Cuerpos*, que encaja a la perfección con las nuevas matemáticas: El Cálculo Diferencial e Integral, que permite fusionar el lenguaje matemático al usar ecuaciones algebraicas que representan cantidades físicas en fenómenos descritos por la geometría!

Así que potenció el pensamiento físico matemático, permitiendo establecer cantidades medibles a diversas propiedades físicas en un sistema (conjunto de cosas que interaccionan entre sí) que cambia, usualmente en el tiempo o con respecto de la temperatura o cualquier otro parámetro.

### **Conceptos fundamentales de Mecánica Newtoniana:**

**1ª Ley de la Inercia:** Todo cuerpo persevera en su estado de reposo o movimiento uniforme y rectilíneo a no ser que sea obligado a cambiar su estado por fuerzas que actúen sobre él.

**2ª Ley de Fuerza:** El cambio en la velocidad del movimiento de un cuerpo es proporcional a la fuerza motriz impresa y ocurre en la línea recta a lo largo de la cual aquella fuerza actúa:  $F = ma = dp/dt$ .

**3ª Ley de Acción y Reacción:** A toda acción corresponde una reacción de igual magnitud y dirección contraria; o sea, las acciones mutuas de dos cuerpos siempre son iguales y dirigidas en sentido opuesto:  $F_{12} = -F_{21}$ .

Un objeto de masa  $m$  moviéndose a una velocidad  $v$  tiene una energía cinética:  $K \equiv mv^2/2$ , y un *impulso lineal*  $\mathbf{p} \equiv m\mathbf{v}$ <sup>1</sup>. Cuando ese objeto choca con otro, la colisión se analiza aplicando dos leyes de conservación fundamentales:

**Conservación de la energía:** La energía de un sistema aislado siempre permanece constante. Es decir, que la energía total de dos partículas antes de colisionar es igual a la energía total después de la colisión.

**Conservación del impulso lineal:** El impulso o momento lineal total  $\mathbf{p}_{Tot} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \dots$ , de un sistema aislado permanece constante. Así, el impulso total de dos partículas antes y después de una colisión será el mismo; y como es una cantidad vectorial, se tiene que se conservará en cada una de las componentes espaciales ( $x, y, z$ ).

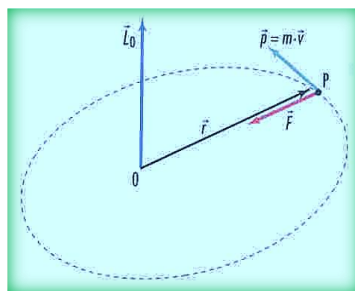
Cuando una partícula se mueve en un campo de fuerzas conservativo; es decir, un espacio en que el trabajo neto realizado,  $W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$  no depende de la trayectoria sino únicamente de las posiciones inicial y final, se define la energía potencial, tal que:  $F \equiv -dV/dx$  (para el caso de una sola dimensión).

La energía total  $E$  es justamente la suma de las energías cinética y potencial; es decir:  $E = K + V$ .

### Conservación del impulso angular:

Cuando un objeto moviéndose con impulso lineal  $\mathbf{p}$  se encuentra a una distancia  $\mathbf{r}$  del origen de un sistema de coordenadas, el *impulso o momento angular*  $\mathbf{l}$  respecto al punto  $O$  se define como:  $\mathbf{l} \equiv \mathbf{r} \times \mathbf{p}$ .

Para un sistema aislado de una o varias partículas, el momento angular, se conserva; siempre y cuando no haya un *torque* externo neto que actúe sobre este.



Impulso o momento angular.

La mecánica newtoniana a su vez consta de amplias ramas de estudio:

- **Mecánica celeste:** Estudia los movimientos de los cuerpos celestes y los efectos gravitatorios que ejercen sobre los otros cuerpos masivos.
- **Mecánica del cuerpo rígido:** Estudia el movimiento de objetos sólidos y con forma constante como el trompo, el giroscopio, etc.,

---

<sup>1</sup> El impulso lineal  $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$  también se conoce como *cantidad de movimiento*, *momento lineal*, *momentum*, ...y es una cantidad que debe recordarse.

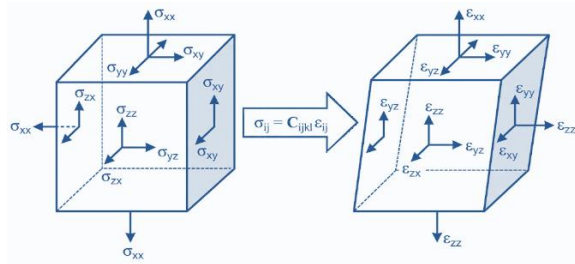
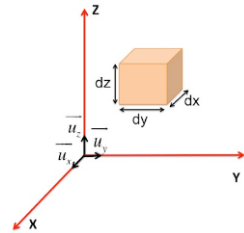
- **Mecánica de los fluidos:** Da origen a la hidrodinámica y temas afines que estudian el comportamiento físico de líquidos y gases.

Ecuación General:  $\nabla p - \rho \nabla \Phi = 0$ , donde el primer término es el cambio en la presión  $p$  y el segundo la fuerza por unidad de volumen en el elemento con densidad  $\rho$  sujeto a la variación del potencial  $\Phi$ .

- **Teoría de la elasticidad:** Estudio de las tensiones  $\sigma_{ij}$  de sólidos elásticos sometidos a pequeñas deformaciones  $\varepsilon_{kl}$ :

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

Un caso particular se presenta cuando las tensiones y las deformaciones están relacionadas linealmente, mediante la ecuación constitutiva:  $\sigma_{ij} = \Sigma_{k,l} C_{ijkl} \varepsilon_{kl}$ .



- **Acústica:** Estudia las ondas mecánicas que se propagan a través de la materia (tanto sólida como líquida o gaseosa). Es decir, la producción, transmisión, almacenamiento, percepción o reproducción del sonido.

Galileo [1564-1642] y Mersenne [1588-1648] descubrieron de forma independiente todas las leyes de la cuerda vibrante, terminando así el trabajo que Pitágoras había comenzado 2000 años antes.

Galileo escribió: *Las ondas son producidas por las vibraciones de un cuerpo sonoro, que se difunden por el aire, llevando al tímpano del oído un estímulo que la mente interpreta como sonido.*

Sentando así el comienzo de la acústica fisiológica y de la psicológica.

Entre 1630 y 1680 se realizaron mediciones experimentales de la velocidad del sonido en el aire por una serie de investigadores, destacando de entre ellos Mersenne. Mientras tanto, Newton obtuvo la fórmula para la velocidad de onda en sólidos, uno de los pilares de la física acústica.

## TERMODINÁMICA

Galileo Galilei inventó el termoscopio [1592], instrumento que consistía en un tubo lleno de agua o alcohol, abierto en su extremo inferior; y con una bola de vidrio llena de aire en el extremo superior. La parte abierta del tubo sobresalía hacia otro recipiente lleno de agua. Al calentarse la bola de vidrio se dilataba el aire interior; que a su vez empujaba el agua del tubo. Luego, en 1612, Santorre Santorio, un colega de él introdujo una graduación numérica al invento de Galileo y le dio un uso medicinal.



Termoscopio

Por último, Gabriel Fahrenheit, en el año 1714, crea el primer termómetro a base de mercurio, con su escala que afirmaba que entre el punto de congelamiento del agua y el de hervor debían pasar 180 grados. Pocos años después, Anders Celsius propondría su escala, que establecía esa distancia en 100 grados.

### Conceptos fundamentales de la Teoría del Calor y sus Efectos:

**Ley Cero:** Existe una determinada propiedad denominada *temperatura empírica*,  $\theta$ , que es común para todos los estados de equilibrio termodinámico que se encuentren en equilibrio mutuo con uno dado.

El equilibrio termodinámico de un sistema se define como la condición cuyas variables empíricas usadas para determinar un estado del sistema (presión, volumen, campo eléctrico, polarización, magnetización, tensión lineal, tensión superficial, coordenadas en el plano  $X, Y$ ) no son dependientes del tiempo.

**1ª Ley de la conservación de la energía:** Constituye el primer principio de la termodinámica y afirma que la cantidad total de energía en cualquier sistema físico aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable en el tiempo, aunque la energía puede transformarse en otra forma de energía.

Así pues, si se realiza trabajo sobre un sistema; o bien, éste intercambia calor con otro, la energía interna del sistema cambiará:

$$E_{entra} - E_{sale} = \Delta E_{sistema}; \quad \text{o bien, } Q - W = \Delta U.$$

**2ª Ley de la Entropía:** Esta ley marca la dirección en la que deben llevarse a cabo los procesos termodinámicos y, por lo tanto, la imposibilidad de que ocurran en el sentido contrario.

También puede expresarse como:  $S = k_B \cdot \ln \Omega$ , donde,  $S$  es la entropía,  $k_B$  la constante de Boltzmann y  $\Omega$  el número de microestados posibles.

**Enunciado de Clausius:** No es posible un proceso cuyo resultado sea la extracción de calor de un recipiente y la absorción de una cantidad igual de calor por un recipiente a temperatura más elevada.

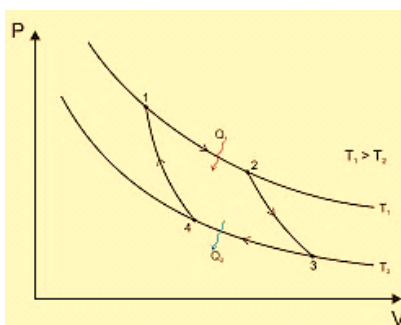
**Enunciado de Kelvin:** No existe ningún dispositivo que, operando por ciclos, absorba calor de una única fuente (energía absorbida) y lo convierta íntegramente en trabajo (energía útil).

**Enunciado de Kelvin-Planck:** Es imposible una máquina térmica que, en un ciclo, no produzca otro efecto que la absorción de energía desde un depósito y la realización de una cantidad igual de trabajo.

Así que, es imposible construir una máquina térmica cíclica que transforme calor en trabajo sin aumentar la energía termodinámica del ambiente.

Debido a esto podemos concluir, que el rendimiento energético de una máquina térmica cíclica que convierte calor en trabajo siempre será menor a la unidad, y ésta estará más próxima a la unidad, cuanto mayor sea el rendimiento energético de la misma.

Es decir, cuanto mayor sea el rendimiento energético de una máquina térmica, menor será el impacto en el ambiente, y viceversa.



Ciclo de Carnot

**3ª Ley de Nernst:** Es imposible alcanzar el cero absoluto de temperatura con un número finito de procesos físicos. A medida que un sistema se aproxima al cero absoluto, su entropía tiende a un valor constante.

Es importante recordar que los principios o leyes de la termodinámica son sólo generalizaciones estadísticas, válidas siempre para los sistemas macroscópicos, pero inaplicables a nivel cuántico.

El establecimiento de las leyes de la termodinámica aunadas a las de la mecánica de Newton pusieron “sobre rieles” la 1ª Revolución Industrial propiamente dicha.

El carbón se convirtió en la principal fuente de energía, alimentando inventos cruciales como la máquina de vapor de James Watt.



Locomotora Stephenson [1825]

## TEORÍA CINÉTICA MOLECULAR

Las leyes de los gases desarrolladas por **Robert Boyle** [1627-1691], **Jacques Charles** [1746-1823] y **Louis Joseph Gay-Lussac** [1778-1850], que establecieron las principales relaciones entre la presión, el volumen y la temperatura de un gas, están basadas en observaciones empíricas y describen el comportamiento de los gases en términos macroscópicos.

La ley de los Gases Ideales o ecuación de estado es:

$$PV = nRT = Nk_B T$$

Donde  $n$  es el número de moles ( $1 \text{ mol} = 6.022 \times 10^{23}$  moléculas),  $R = 0.082 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K})$  es la constante universal de los gases,  $N$  el número de partículas y  $k_B = 1.380 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  es la constante de Boltzmann.

La ecuación cinética térmica media para las moléculas de un gas ideal a temperatura  $T$  es:  $E_c = \frac{3}{2} k_B T$ , expresa que la energía cinética de un gas es directamente proporcional a la temperatura ( $K$ ).



**LUDWIG BOLTZMANN**



**[1844-1906]**

Las ideas de Boltzmann fueron revolucionarias y sentaron las bases de gran parte de la física moderna:

**Mecánica Estadística:** aplicó la estadística y la probabilidad a las leyes de la mecánica (clásica y cuántica) para predecir y explicar las propiedades observables de sistemas con un gran número de partículas.

**Ecuación de Entropía** ( $S = k \ln W$ ): Relaciona la entropía ( $S$ ) de un sistema (una medida de su desorden) con el número de microestados posibles ( $W$ ) que corresponden al mismo macroestado observable.

**Ley de Stefan-Boltzmann:** derivó teóricamente la ley de radiación del cuerpo negro que Josef Stefan había descubierto experimentalmente, demostrando que la energía térmica radiante total emitida por una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

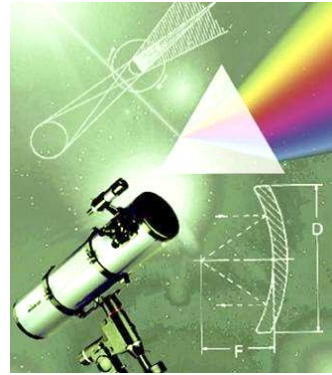
A pesar de enfrentar gran escepticismo por muchos colegas (especialmente Ernst Mach y Wilhelm Ostwald, que se oponían a la existencia de los átomos), sus teorías fueron validadas experimentalmente después de su muerte, a través de los estudios del movimiento browniano realizados por Jean Perrin, basándose en los trabajos teóricos de Albert Einstein.

## ÓPTICA

Estudia la luz y los diversos fenómenos que produce al interactuar con la materia, como su generación, propagación y detección. Se divide en varias ramas que incluyen su desarrollo clásico:

**Óptica Geométrica:** Se basa en el modelo de la luz como rayos que viajan en línea recta.

Utiliza la geometría para predecir la trayectoria de la luz y es útil para comprender la reflexión en los espejos, la refracción al cambio de medio de propagación y el funcionamiento de las lentes y otros instrumentos ópticos, así como explicar fenómenos como la formación del arcoíris.



### Nombre

### Contribución



SIR ISAAC NEWTON



[1642-1727]

Demostró experimentalmente la verdadera naturaleza de la luz y el color, desafiando las ideas previas que sostenían que los colores eran "modificaciones" de la luz pura. Sus hallazgos se publicaron principalmente en su influyente obra *Opticks* (1704), en la que estableció la posibilidad de que la luz estuviera compuesta por partículas.

Demostró que la luz blanca del Sol no es pura, sino una mezcla de varios colores (rojo, naranja, amarillo, verde, azul, índigo y violeta). Al pasar la luz blanca a través del prisma, se refractaba (doblaban) y se separaba en un espectro de colores porque cada color se refracta en un ángulo ligeramente diferente.

Con un segundo prisma invertido en el camino del espectro de colores, recombinó los colores para formar luz blanca de nuevo.

Concluyó que los telescopios de lentes sufren aberración cromática (bordes borrosos) porque cada color se enfoca en un punto ligeramente diferente. En 1668 creó el telescopio de espejo reflector parabólico (con un espejo primario cóncavo y uno secundario plano) evitando así el problema de la aberración cromática.

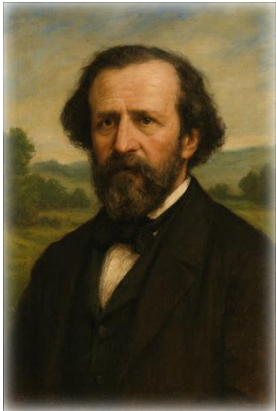


**AUGUSTIN FRESNEL**  
[1788-1827]

Ingeniero y físico francés, fue una figura central en el establecimiento de la teoría ondulatoria de la luz, que desafió y finalmente superó a la teoría corpuscular predominante de Isaac Newton.

Construyó la teoría matemática de las ondas luminosas fundamentada en el trabajo experimental de Thomas Young y extendió el principio de Huygens a más fenómenos ópticos.

En 1818, propuso un experimento para medir la velocidad a la que la luz atravesaba un líquido en movimiento.



**HIPPOLYTE FIZEAU**  
[1819-1896]

En 1849 midió la velocidad de la luz calculando su tiempo de viaje de ida y vuelta a un espejo situado a 8.6 km de distancia, ajustando la velocidad de giro de una rueda dentada con un orificio. Su resultado fue de aproximadamente 313,300 kilómetros por segundo, lo cual estaba a un 5% del valor real.

También midió la velocidad de la luz en agua que fluía, lo que proporcionó evidencia que contradecía las teorías del "éter lumínico". Sus resultados, que concordaban con la teoría de Fresnel, fueron fundamentales más tarde para el desarrollo de la teoría de la relatividad especial de Einstein.

**Óptica Física:** Abarca desde el enfoque clásico hasta el moderno:

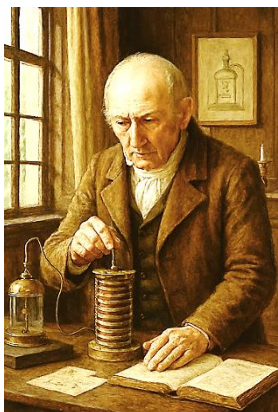
- **Teoría ondulatoria:** Estudia la luz como onda electromagnética.
- **Óptica Cuántica:** Se adentra en la naturaleza corpuscular de la luz (fotones) y su interacción a nivel subatómico, estudiando fenómenos que involucran la dualidad onda-partícula de la luz.
- **Óptica Electrónica:** Una rama especializada que se enfoca en el estudio de haces de electrones, su desviación y enfoque mediante campos eléctricos y magnéticos.

## TEORÍA ELECTROMAGNÉTICA

Estudia la interacción entre partículas cargadas y los campos eléctricos y magnéticos. Su desarrollo culminó con la unificación de la electricidad, el magnetismo y la radiación en una sola teoría coherente.

### Nombre

### Contribución



**ALESSANDRO VOLTA**



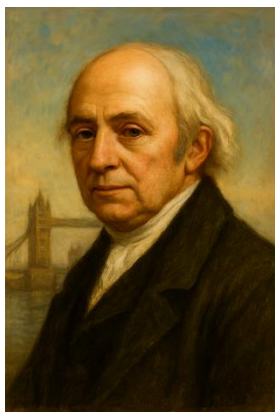
[1745-1827]

En 1800 inventó la primera pila eléctrica apilando cobre, zinc y papel, y un dispositivo generador de corriente continua (electróforo) que consistía en una serie de discos alternados de zinc y cobre separados por paños con solución salina.

Este dispositivo fue la primera fuente capaz de producir una corriente eléctrica continua y fiable, refutando la teoría de la "electricidad animal" de Luigi Galvani. Sentó las bases para el estudio de la electroquímica.

En honor a sus descubrimientos, la unidad de potencial eléctrico o fuerza electromotriz recibió el nombre de voltio en 1881.

Entre 1776 y 1778, investigó y logró aislar el gas metano ( $\text{CH}_4$ ) y descubrió que una mezcla de metano y aire podía explosionar con una chispa eléctrica, principio que más tarde se aplicaría en los motores de combustión interna.



**WILLIAM NICHOLSON**

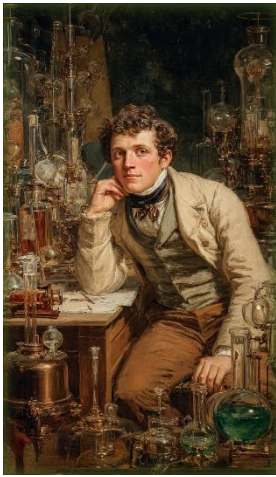


[1753-1815]

Científico inglés, editor, periodista e inventor, construyó la primera pila voltaica en Inglaterra, fue famoso en 1800 por demostrar la electrólisis del agua, un proceso fundamental en química.

Perfeccionó la pila de Volta y, junto con A. Carlisle, descubrió la electrólisis. Descompuso agua con una corriente eléctrica, comprobando una vez más la Teoría Atómica del químico Inglés John Dalton [1766-1844].

También fundó la primera revista científica mensual de Gran Bretaña, la *Journal of Natural Philosophy, Chemistry, and the Arts*, y fue un prolífico escritor y traductor en temas científicos.



**SIR HUMPHRY DAVY**



[1778-1829]

Desarrolló la electroquímica explorando el uso de la pila de Volta o batería (con centenares de placas de cobre) que le permitieron, mediante la electrólisis, aislar un gran número de elementos químicos entre los que se encuentran: calcio, sodio, potasio, boro, magnesio, estroncio y cloro. También estudió la energía involucrada en los procesos de separación.

En 1799 experimentó con óxido nitroso y quedó asombrado de cómo lo hacía reír, por lo que lo apodó "gas hilarante" y escribió sobre sus posibles propiedades anestésicas para aliviar el dolor durante la cirugía.

Inventó la lámpara de arco, que fue la primera aplicación que ponía en evidencia el potencial práctico de las corrientes eléctricas.



**MICHAEL FARADAY**



[1791-1867]

A pesar de la escasa educación formal recibida, Faraday, es uno de los científicos más influyentes de la historia, ya que fue un excelente experimentador, que transmitió sus ideas en un lenguaje claro y simple. Sus habilidades matemáticas, sin embargo, no abarcaban más allá de la trigonometría y el álgebra básica.

Fue el primero en licuar gases por presión; produjo temperaturas bajo cero (Fahrenheit); descubrió el benceno y desarrolló la electroquímica (suyos son los términos de electrolito, electrólisis, electrodos, ánodo, cátodo, etc.). Descubrió la primera ley cuantitativa de la electroquímica,

**Ley de Faraday:** Un campo magnético cambiante  $\Delta\Phi B$  induce una corriente eléctrica en un conductor,  $\mathcal{E} = \Delta\Phi B / \Delta t$  es la fuerza electromotriz inducida.

Inventó el motor eléctrico, el generador eléctrico, el transformador de corriente alterna y descubrió el fenómeno de la inducción.

Concibió nociones fundamentales, como las de línea de fuerza y de campo magnético que dieron base a la actual teoría electromagnética.



**HANS CHRISTIAN ØRSTED**  
 [1777-1851]

Físico y químico danés reconocido por descubrir en 1820, de forma experimental la relación física entre la electricidad y el magnetismo y que las corrientes eléctricas producen efectos magnéticos.; con lo que estableció la conexión fundamental entre la electricidad y el magnetismo. Este hallazgo sentó las bases para el desarrollo de la tecnología moderna, incluyendo los motores eléctricos y las telecomunicaciones.

En 1825, fue el primero en aislar y producir una forma impura del elemento químico aluminio mediante una reacción química.

Desempeñó un papel clave en la creación de la Universidad Técnica de Dinamarca.



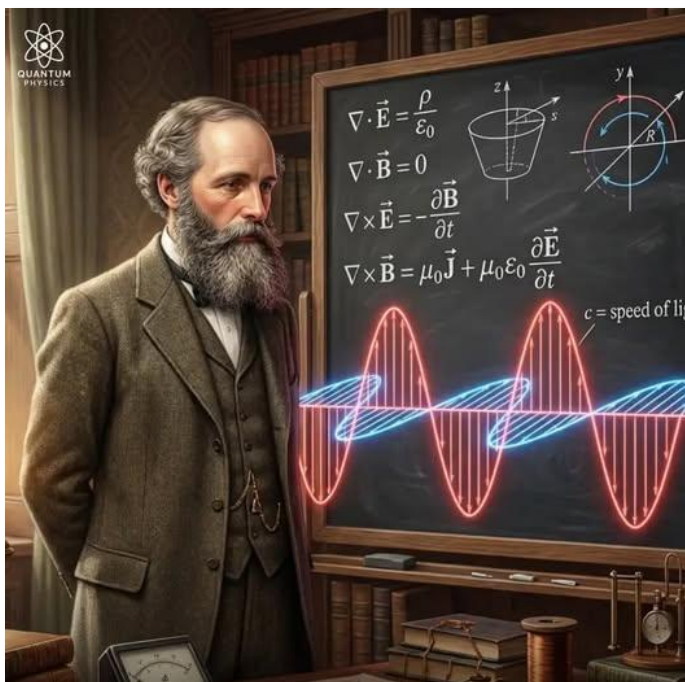
**ANDRÉ-MARIE AMPÈRE**  
 [1775-1836]

Fue aclamado como uno de los fundadores del electromagnetismo (o electrodinámica, como él lo llamó). Su trabajo pionero sentó las bases para la comprensión de la relación entre la electricidad y el magnetismo.

Tras el descubrimiento de Hans Christian Ørsted en 1820 sobre la desviación de una brújula por una corriente eléctrica, Ampère demostró que dos conductores paralelos con corriente en la misma dirección se atraen, y si las corrientes fluyen en direcciones opuestas, se repelen; y que las corrientes eléctricas producen fuerzas mecánicas.

**Ley de Ampère:** Describe cómo una corriente eléctrica produce un campo magnético, y que la circulación del campo magnético a lo largo de un contorno cerrado es proporcional a la corriente que lo atraviesa.

Inventó el primer telégrafo eléctrico y, junto con François Arago, el electroimán. Formuló en 1827 la Teoría del Electromagnetismo.



**JAMES CLERK MAXWELL**

 [1831-1879]

Fue un físico y matemático escocés, reconocido por formular la Teoría Clásica del Electromagnetismo. Esta teoría unificó por primera vez la electricidad, el magnetismo y la luz como manifestaciones de un mismo fenómeno: el *campo electromagnético*, un logro comparable a las leyes del movimiento de Isaac Newton.

### Leyes de la Electricidad y el Magnetismo

**Fuerza electrostática:** Es la fuerza de Coulomb entre dos partículas cargadas  $q_1$  y  $q_2$ :  $F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2}$ ; donde,  $1/4\pi\epsilon_0 = 8.988 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{C}^2$  y  $r$  es la separación entre las cargas.

La energía potencial correspondiente se define por:  $V = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r}$ .

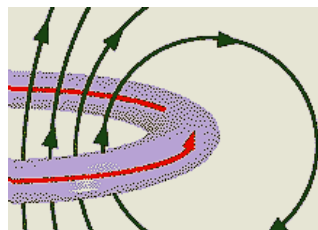
**Campo electromagnético:** Se caracteriza por la intensidad de los campos eléctrico  $\mathbf{E}$  y magnético  $\mathbf{B}$ .

**Campo eléctrico:** El campo eléctrico radial debido a una carga  $q$  localizada en el origen de un sistema coordenado está dado por:  $\mathbf{E} = q\hat{\mathbf{r}}/4\pi\epsilon_0 r$ ; donde  $\hat{\mathbf{r}}$  es un vector unitario en la dirección radial.

**Campo magnético generado por un alambre con corriente:** El campo magnético a distancia  $r$  de un alambre largo, recto a la largo del eje  $Z$  de un sistema de coordenadas, y a través del cual circula una corriente, es:  $\mathbf{B} = \mu_0 i \hat{\theta} / 2\pi r$ ; donde  $\hat{\theta}$  es un vector en coordenadas cilíndricas.

### Campo magnético generado por una espira de corriente:

Una corriente eléctrica  $i$  causa un campo magnético  $B$ ; para una espira circular de corriente de radio  $r$ , el campo magnético de tal espira está dado por la ecuación:  $B = \mu_0 i / 2r$ . En unidades del SI (Sistema Internacional) se mide en teslas,  $1 T = 1 N/A \cdot m$ .



Campo magnético.

La constante  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N \cdot s^2 / C^2$ . Hay que recordar que la corriente  $i$  fluye en la dirección convencional (positiva) opuesta al sentido real en el que viajan los electrones cargados negativamente que da lugar a la corriente.

**Momento magnético:** Para una espira de corriente se define el momento magnético como  $|\boldsymbol{\mu}| \equiv iA$ ; con  $A$  el área que encierra la espira. La dirección de  $\boldsymbol{\mu}$  es perpendicular al plano de la espira. Al colocar la espira en un campo magnético externo  $\mathbf{B}_{ext}$  aparece una torca  $\boldsymbol{\tau}$  sobre la ella que tiende a alinear el momento magnético  $\boldsymbol{\mu}$  con  $\mathbf{B}_{ext}$ ; de modo que:  $\boldsymbol{\tau} = \boldsymbol{\mu} \times \mathbf{B}_{ext}$ .

### Ecuaciones de Maxwell para un medio lineal e isótropo:

| Nombre                           | Forma diferencial                                                                                       | Forma integral                                                                                                                                               |
|----------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LEY DE GAUSS:                    | $\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}; \rho = \frac{Q}{V}$                                 | $\oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = \frac{Q}{\epsilon_0}$                                                                                                |
| LEY DE GAUSS DE CAMPO MAGNÉTICO: | $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$                                                                           | $\oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0$                                                                                                                   |
| LEY DE FARADAY:                  | $\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}$                                    | $\oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s}$                                                                  |
| LEY DE AMPERE GENERALIZADA:      | $\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$ | $\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l}$ $= \mu_0 \oint_S \mathbf{J} \cdot d\mathbf{s}$ $+ \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \oint_S \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s}$ |

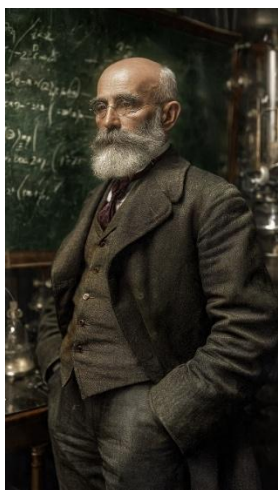
Donde,  $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} C^2 / J \cdot m$ ;  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} N \cdot s^2 / C^2$ .

Y Donde:

|                                               |              |                                          |
|-----------------------------------------------|--------------|------------------------------------------|
| $\rho$ $\equiv$ densidad de carga             | $[Cm^{-3}]$  | $(1 C \equiv Coulombio = 1 A \cdot s)$   |
| $J$ $\equiv$ densidad de corriente            | $[A m^{-2}]$ |                                          |
| $E$ $\equiv$ campo eléctrico                  | $[V m^{-1}]$ |                                          |
| $B$ $\equiv$ inducción magnética              | $[T]$        | $(1 T \equiv Tesla = 1 N A^{-1} m^{-1})$ |
| $\varepsilon$ $\equiv$ permitividad eléctrica | $[F m^{-1}]$ | $(1 F \equiv Faradio = 1 C V^{-1})$      |
| $\mu$ $\equiv$ permeabilidad magnética        | $[N A^{-2}]$ |                                          |

$$\nabla = ( \partial/\partial x , \partial/\partial y , \partial/\partial z ) ; \nabla^2 = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$$

Estas ecuaciones no expresan directamente la relación entre cargas y fuerzas, sino que están escritas en términos de *campos* ( $E$  y  $B$ ).



**HENDRIK LORENTZ**



**[1853-1928]**

**PREMIO NOBEL DE**

**FÍSICA 1902**



Realizó contribuciones fundamentales al entendimiento del electromagnetismo y sentó las bases para la teoría de la relatividad de Albert Einstein.

En 1890, propuso que los átomos contenían partículas cargadas (que más tarde se identificarían como electrones) y que ellas, al oscilar dentro del átomo, producían la luz radiada y se veían afectadas por campos magnéticos.

Formuló las ecuaciones matemáticas, conocidas como las transformaciones de Lorentz, que describen cómo las mediciones de espacio y tiempo cambian para observadores en movimiento relativo a altas velocidades. Estas ecuaciones introdujeron conceptos como la contracción de la longitud y la dilatación del tiempo, que fueron fundamentales para la teoría de la relatividad especial de Einstein.

Desarrolló la ecuación que describe la fuerza total que experimenta una partícula cargada al moverse a través de un campo eléctrico y un campo magnético combinados.

**Fuerza de Lorentz:** es ejercida por un campo electromagnético sobre una carga:  $\mathbf{F} \equiv q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$ .

Compartió el premio Nobel de Física de 1902 con su colega y antiguo alumno, Pieter Zeeman, por su investigación sobre la influencia del magnetismo en la radiación (el *efecto Zeeman*).



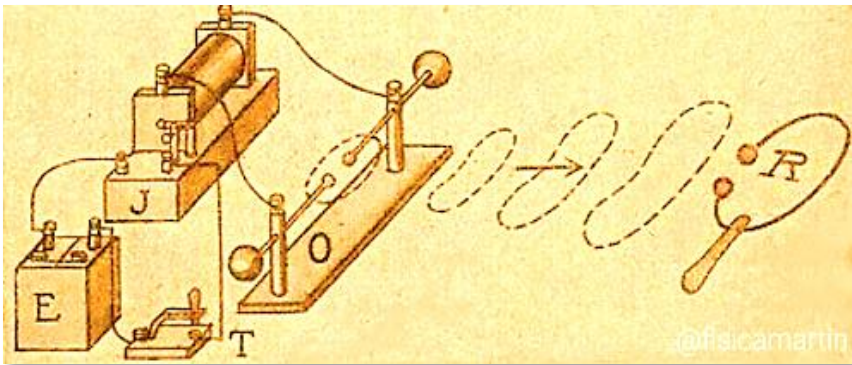
**HEINRICH HERTZ**  
 [1857-1894]

Conocido principalmente por ser el primero en demostrar de forma concluyente la existencia y propagación de las ondas electromagnéticas; y las formas para producirlas y detectarlas.

Sus experimentos dieron confirmación empírica de la teoría electromagnética desarrollada por James Clerk Maxwell, sentando las bases para las modernas tecnologías de comunicación inalámbrica.

Durante sus investigaciones, Hertz notó incidentalmente que una chispa eléctrica era más fuerte si se iluminaba con luz ultravioleta. Esta observación fue el primer indicio del efecto fotoeléctrico, un fenómeno que es fundamental para la mecánica cuántica.

### Esquema del experimento de Hertz:



Con este experimento descubrió las ondas de radio: A la izquierda el transmisor que consiste en una antena dipolo hecha de dos varillas horizontales, con el chispero (O) entre ellos, y en los extremos dos esferas o placas metálicas que hacen de condensadores.

Este sistema se conecta con una bobina de inducción (J) que es alimentada por una batería (E) cuando se cierra el interruptor (T).

A la derecha se muestra el receptor que consiste en un anillo de alambre, con un espacio micrométrico (R) donde se producen chispas al recibir ondas de radio.



**ALEXANDER POPOV**  
 [1859-1905]

Físico e ingeniero eléctrico ruso aclamado en su país como el inventor de la radio. Fue un pionero en la comunicación inalámbrica, y sus experimentos dieron una prueba crucial de las teorías sobre ondas electromagnéticas de James Clerk Maxwell y Heinrich Hertz.

Fue el inventor de la antena y con ella pudo hacer transmisiones de ondas electromagnéticas a distancia.

En marzo de 1896, Popov realizó la primera transmisión inalámbrica de un mensaje en código Morse entre dos edificios del campus de la Universidad de San Petersburgo. El mensaje constaba de las palabras "*HEINRICH HERTZ*".



**GUGLIELMO MARCONI**  
 [1874-1937]

**PREMIO NOBEL DE  
FÍSICA 1909** 

Inventor e ingeniero eléctrico italiano, fue ampliamente reconocido como el principal impulsor de la radio y la comunicación inalámbrica práctica. Basándose en los descubrimientos científicos previos sobre ondas electromagnéticas de James Clerk Maxwell y Heinrich Hertz, Marconi desarrolló la tecnología para enviar y recibir señales telegráficas sin cables a largas distancias, transformando las comunicaciones globales.

Realizó la primera comunicación por radio (es decir, radiotelegráfica) intercontinental en 1901 y en 1909, Marconi fue galardonado con el Premio Nobel de Física, compartido con Karl Ferdinand Braun, en reconocimiento a sus contribuciones al desarrollo de la telegrafía inalámbrica.

**El Debate sobre la Invención de la Radio:** El trabajo de Popov se desarrolló de forma independiente y casi simultánea al de Guglielmo Marconi en Italia. Mientras que Popov se centró más en la demostración científica y la aplicación naval sin buscar patentes internacionales, Marconi se enfocó en el desarrollo de un sistema comercialmente viable y patentó su invención en 1896. A nivel internacional, Marconi suele recibir el crédito por la invención de la radio práctica, mientras que Popov es reconocido como un pionero e inventor independiente.



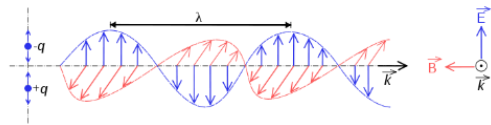
**LEE DE FOREST**  
 **[1873-1961]**

Inventor con aproximadamente 300 patentes registradas, entre las que destaca el triodo, primer dispositivo amplificador conocido como bulbo electrónico, de donde nace la electrónica.

A pesar de sus revolucionarios inventos, su carrera estuvo llena de dificultades financieras y numerosas batallas legales por patentes, a menudo vendiendo sus derechos a precios muy bajos. Aunque fue ampliamente honrado con premios como la Medalla de Honor del IRE y la Medalla Edison del AIEE, murió con un patrimonio modesto en 1961.

## Teoría de Ondas Electromagnéticas

**Onda electromagnética:** Se produce cuando una carga se acelera o una corriente varía con el tiempo, generando una variación de  $\mathbf{E}$  y  $\mathbf{B}$  con la posición  $r$  y en el tiempo  $t$ .



Onda electromagnética.

Una onda electromagnética plana que viaja en la dirección  $X$  puede ser descrita en su forma más simple como:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \hat{\mathbf{z}} \quad [1]$$

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 \sin(kx - \omega t + \phi) \hat{\mathbf{y}}$$

Donde  $k = 2\pi/\lambda$  [rad/m] es el número de onda (ciclos por unidad de longitud),  $\omega = 2\pi\nu$  [rad/s] la frecuencia angular (el ángulo girado por unidad de tiempo) y  $\phi$  es una fase o corrimiento respecto del origen del sistema coordenado. La frecuencia de la onda y su periodo están relacionados por la expresión  $\nu = 1/T$  [Hz]; y  $\lambda$  y  $\nu$ , a su vez por la ecuación:  $c = \lambda\nu$ .

**Polarización de una onda electromagnética:** Se representa por el vector  $\mathbf{E}_0$ , que determina el plano de polarización junto con la dirección de propagación  $\mathbf{S}$ , en este caso el eje  $X$ ; así definidos determinan la dirección de  $\mathbf{B}_0$ , ya que se debe cumplir necesariamente:

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{B} / \mu_0 \quad [2]$$

Para la onda plana, esto conduce a:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} E_0 B_0 \sin^2(kx - \omega t + \phi) \hat{x} \quad [3]$$

**Vector de Poynting,  $\mathbf{S}$ :** Establece la dirección de propagación de la onda electromagnética y tiene dimensiones de energía por unidad de tiempo y área,  $[J/s \cdot m^2] = [W/m^2]$ .

**Potencia  $P$  transportada por una onda electromagnética:** Está dada por  $P = |\mathbf{S}| = |\mathbf{E} \times \mathbf{B}/\mu_0|$ ; y como se tiene que  $E = cB$  se puede escribir:

$$P = \frac{1}{\mu_0 c} E_0^2 \sin^2(kx - \omega t + \phi) \quad [4]$$

Así que es proporcional al cuadrado de la amplitud de la onda. Como la amplitud varía en el tiempo puede calcularse un promedio  $\bar{P}$  para un intervalo dado, así entonces:

$$\bar{P} = \frac{1}{T} \int_0^T P dt = \frac{E_0^2}{2\mu_0 c} \quad [5]$$

Ya que el valor promedio de  $\sin^2(\theta)$  es  $1/2$ .

Una onda electromagnética puede entenderse como una perturbación que se propaga en el espacio electromagnético y se expresa como una función de la posición y del tiempo  $\psi(\mathbf{r}, t)$ .

Matemáticamente, dicha función es una onda si se verifica que:  $\nabla^2 \psi(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$ , donde  $v$  es la velocidad de propagación de la onda.

Hay dos velocidades diferentes asociadas a las ondas, la primera es la velocidad de fase, que es la velocidad de propagación de la onda:  $v_p = \lambda v = \frac{\omega}{k}$ . La segunda es la velocidad de grupo, la cual da la velocidad con la que las variaciones en la forma de la amplitud de la onda se propagan por el espacio:  $v_g = \frac{\partial \omega}{\partial k}$ .

**Ondas electromagnéticas en medios no conductores:** En los medios en los que no hay cargas ni corrientes libres, las ecuaciones de los campos electromagnéticos son:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E} &= 0, & \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, & \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} &= 0, \\ \nabla \times \mathbf{B} - \frac{\epsilon \mu}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad [6]$$

Donde,  $\mathbf{E} = \mathbf{D}/\epsilon$  y  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ , con  $\mathbf{D}$  y  $\mathbf{B}$  las densidades de flujo de campo respectivamente.

Tomando el rotacional de la tercera ecuación:  $\nabla \times \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c} \nabla \times \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \mathbf{0}$ ,

lo cual permite cambiar el orden de las derivadas espacial y temporal; y usando las identidades de operadores vectoriales, al sustituir  $\nabla \times \mathbf{B}$  en la ecuación se tiene:  $\nabla(\nabla \cdot \mathbf{E}) - \nabla^2 \mathbf{E} + \frac{1}{c} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{\epsilon \mu}{c} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = \mathbf{0}$ ; pero  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ ,

$\Rightarrow \nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$ . Realizando operaciones análogas en la cuarta ecuación, se obtiene:  $\nabla^2 \mathbf{B} - \frac{\epsilon \mu}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{B}}{\partial t^2} = 0$ .

Ambas son ecuaciones de onda. Del coeficiente de las derivadas temporales, se ve que la velocidad de propagación de las ondas es  $v = c/\sqrt{\epsilon \mu}$ .

Debido a que en la mayoría de los materiales  $\epsilon > 1$  y  $\mu \approx 1$ , la velocidad de propagación en esos medios es  $< c \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ , que es la velocidad de la luz en el espacio vacío (para la cual  $\epsilon = 1, \mu = 1$ ).

Las ecuaciones anteriores son vectoriales, de modo que son válidas para cada componente rectangular.

**Ondas planas:** Para hallar estas soluciones se elige la dirección de propagación perpendicular  $\hat{e}_x$ .

$\Rightarrow$  en general para cada componente se tiene:  $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} - \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = 0$ ;  $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon \mu}}$   
“Onda monocromática”.

La solución general de la ecuación de onda unidimensional es:

$$\psi(x, t) \sim e^{ik(x-vt)} = e^{i(kx - \omega t)} = \cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t); \quad [7]$$

$$k = \frac{\omega}{v} = \frac{\omega \sqrt{\epsilon \mu}}{c} = \frac{2\pi}{\lambda};$$

El índice de refracción definido por la razón de velocidades  $c/v$  se puede escribir como:  $n = \sqrt{\epsilon \mu}$  lo cual establece una la conexión entre el enfoque electromagnético y el óptico.

Para considerar una dirección de propagación más general se define  $|\mathbf{k}| = k$  perpendicular al frente de onda. De modo que para una dirección arbitraria se tiene:  $\psi(\mathbf{r}, t) \sim e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)}$ .

Entonces puede escribirse una onda electromagnética plana, monocromática en la forma:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad \text{y} \quad \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{B}_0 e^{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)} \quad [8]$$

La derivada en el tiempo de una onda así es simple:  $\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = -i\omega \mathbf{E}$ .

# FÍSICA MODERNA

Mecánica Cuántica y teorías vinculadas con ella, como son la física atómica, la nuclear y la de partículas elementales.

| Nombre | Contribución |
|--------|--------------|
|--------|--------------|



**MAX PLANCK**



[1858-1947]

**PREMIO NOBEL DE**

**FÍSICA 1918**

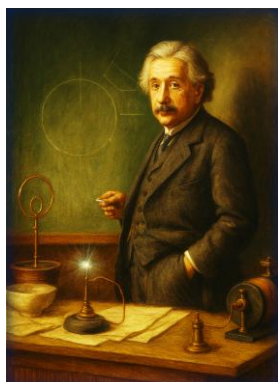


Reconocido como el fundador de la teoría cuántica y uno de los pioneros de la física moderna. Su trabajo revolucionó la comprensión de los procesos atómicos y subatómicos

Formuló la *Ley de Planck* para la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico bajo la hipótesis de que la energía electromagnética que absorbe o que emite un cuerpo negro viene en "paquetes" y sólo se pueden intercambiar paquetes enteros de energía, a los que llamó *cuantos*.

Descubrió una constante fundamental, la denominada constante de Planck, usada para calcular la energía de un fotón.  $E = h\nu$ .

Fue de los primeros en reconocer y defender la teoría de la relatividad especial de Einstein.



**ALBERT EINSTEIN**



[1879-1955]

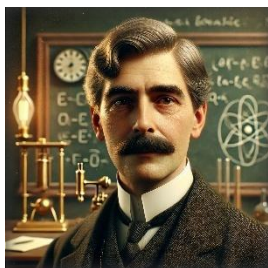
**PREMIO NOBEL DE**

**FÍSICA 1921**



Aplicó sus métodos estadísticos con la fórmula de Planck para calcular fluctuaciones de energía en la luz, comparó sus resultados con los que había obtenido pocos años antes para las fluctuaciones de la energía de un gas diluido y encontró que: ¡eran iguales a las del nuevo término recién descubierto por él!

Luego aquí estaba la explicación a la hipótesis de Planck: *En el campo electromagnético existen componentes similares a las moléculas de un gas*, es decir, ¡pequeños corpúsculos o "paquetes" luminosos que porta cada uno una energía definida y se pueden ver como "moléculas" de luz! Con el tiempo se les llamó fotones.



**ERNEST RUTHERFORD**



**[1871-1937]**

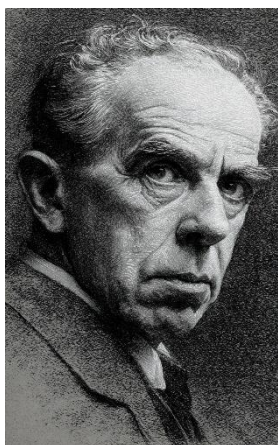
**PREMIO NOBEL DE  
QUÍMICA 1908** 

Físico británico nacido en Nueva Zelanda, considerado el "*padre de la física nuclear*". Es mundialmente famoso por su modelo atómico nuclear.

Se dedicó al estudio de las partículas radiactivas y logró clasificarlas en *alfa*, *beta* y *gamma*.

Demostró que los átomos tienen una estructura similar a la de un sistema planetario.

Descubrió el protón en 1919, al bombardear núcleos de nitrógeno con partículas alfa, lo que resultó en la emisión de núcleos de hidrógeno.



**NIELS BOHR**



**[1885-1962]**

**PREMIO NOBEL DE  
FÍSICA 1922** 

Físico danés que realizó contribuciones fundamentales para la comprensión de la estructura del átomo y la Mecánica Cuántica.

### **Postulados de Bohr**

**Primer Postulado:** Un electrón en un átomo se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo bajo la influencia atractiva de Coulomb entre el electrón y el núcleo, sujetándose a las leyes de la mecánica clásica.

**Segundo Postulado:** En lugar de una infinidad de órbitas posibles, en la mecánica clásica, un electrón solo puede moverse en una órbita para la cual su impulso angular orbital  $L$  es un múltiplo entero de  $\hbar$ , la constante de Planck dividida entre  $2\pi$ . De modo que  $L = n\hbar$ ,  $n \in \mathbb{N}$ .  
*Cuantización del momento angular.*

**Tercer Postulado:** A pesar de que el electrón se acelera constantemente cuando se mueve en estas órbitas permitidas, no radia energía, su energía total  $E$  permanece constante.

**Cuarto Postulado:** Se emite radiación si un electrón en una órbita de energía total  $E_i$  cambia su movimiento de manera discontinua para moverse en una órbita de menor energía total  $E_f$ . La frecuencia de la radiación emitida  $\nu$  es igual a la cantidad  $(E_f - E_i)/h$ . *Postulado de Einstein.*

## Radio orbital, el momento angular y velocidad orbital:

Considérese un átomo con un núcleo de carga  $+Ze$ , masa  $M$  y un solo electrón de carga  $-e$  y masa  $m_e$ . Para un átomo de hidrógeno neutro  $Z = 1$ , para un átomo de helio simplemente ionizado  $Z = 2$ , para un átomo de litio doblemente ionizado  $Z = 3$ , etc. Si el electrón se mueve en una órbita circular alrededor del núcleo y se supone que la masa del electrón es despreciable comparada con la del núcleo, asumiendo que el núcleo permanece fijo en el espacio. La condición de estabilidad mecánica del electrón es:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = m_e \frac{v^2}{r} \quad [1]$$

Donde  $v$  es la velocidad del electrón en su órbita, y  $r$  es el radio de esta. El primer miembro de esta ecuación es la fuerza de Coulomb que actúa sobre el electrón y el segundo miembro es  $ma$  donde  $a$  es la aceleración centrípeta que mantiene al electrón en su órbita circular. El impulso angular orbital del electrón,  $L = m_e vr$ , deberá ser constante ya que la fuerza está en dirección radial. Aplicando la condición de cuantización a  $L$ :

$$L = m_e vr = n\hbar; \quad n \in \mathbb{N}. \quad [2]$$

Resolviendo para  $v$  se tiene  $v = n\hbar/m_e r$  y sustituyendo en [1]:

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r^2} = \frac{m_e}{r} \left( \frac{n\hbar}{m_e r} \right)^2,$$

de modo que:

$$r_n = 4\pi\epsilon_0 \frac{n^2 \hbar^2}{m_e Ze^2} = \frac{n^2 a_0}{Z} \quad \text{y} \quad v = \frac{n\hbar}{m_e r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{n\hbar}; \quad n \in \mathbb{N}. \quad [3]$$

Los radios orbitales permitidos son proporcionales al cuadrado del número cuántico  $n$ .

Al evaluar el radio de la órbita más pequeña ( $n = 1$ ) y su velocidad correspondiente para un átomo de hidrógeno ( $Z = 1$ ) se obtiene:  $r_0 = 0.53 \text{ \AA} \equiv a_0$  (radio de Bohr) y  $v_0 = 2.2 \times 10^6 \text{ m/s}$ .

La velocidad es menor que el 1% de la velocidad de la luz, lo que justifica el uso de la mecánica clásica en el modelo de Bohr en vez de la mecánica relativista; para valores grandes de  $Z$  la velocidad del electrón se hace relativista y el modelo deja de ser aplicable.

**Energía total del electrón:** Para un electrón la energía potencial  $V$  para cualquier distancia finita  $r$  se puede obtener integrando el trabajo que haría la fuerza de Coulomb actuando desde  $r$  hasta  $\infty$ .

Así que:

$$V = - \int_r^\infty \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr = - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad [4]$$

La energía potencial es negativa debido a que la fuerza de Coulomb es atractiva y se requiere hacer trabajo para mover al electrón desde  $r$  hasta el infinito en contra de la fuerza.

Con ayuda de la condición de estabilidad mecánica del electrón, se puede evaluar la energía cinética del electrón:  $K = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{2r}$ .

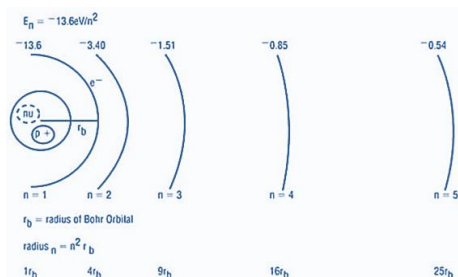
Entonces la energía total del electrón es:  $E = K + V = - \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 2r}$ .

Sustituyendo el valor encontrado para  $r_n$  en, se encuentra que:

$$E_n = - \frac{m_e Z^2 e^4}{(4\pi\epsilon_0)^2 2\hbar^2 n^2} \quad [5]$$

La cuantización del impulso orbital del electrón conduce a la cuantización de su energía total. Por encima del estado discreto más alto  $E \geq 0$ , los electrones se encuentran en un estado no ligado y su energía deja de estar cuantizada pudiendo tener cualquier energía dentro de un continuo como electrones libres.

**Energía de ionización:** En el modelo de Bohr del átomo de hidrógeno, el menor valor permitido (el más negativo) de la energía total electrónica, ocurre para el número cuántico más pequeño,  $n = 1$ , este es el estado base, el más estable para el electrón y corresponde a una energía de enlace:  $E = -13.6 \text{ eV}$ , también conocida como *energía de ionización*.



Energías de *amarre* del átomo de hidrógeno:

$$E_n = -13.6 \text{ eV} \cdot Z/n^2.$$

A medida que el número cuántico va aumentando la energía se hace menos negativa, aproximándose a cero conforme  $n$  se aproxima a infinito. Cuando  $n = \infty$ , la energía es cero, el electrón deja de estar ligado y el átomo queda ionizado.



**LOUIS DE BROGLIE**



**[1892-1987]**

**PREMIO NOBEL DE**

**FÍSICA 1929**



En su tesis doctoral de 1924 propuso la idea de que a todo movimiento es necesario asociar una onda, y dio una fórmula para hacerlo:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

donde:

- $\lambda$  es la longitud de onda de la partícula.
- $h$  es la constante de Planck.
- $p$  es el momento de la partícula.

Así, estableció la mecánica ondulatoria, que es una de las versiones originales de la mecánica cuántica; en la que un electrón bajo ciertas condiciones se comporta como un corpúsculo (por ejemplo, en el efecto Compton, es decir, cuando choca con un fotón), pero que en otras circunstancias se comporta como una onda explicando la difracción de electrones (por ejemplo, en el microscopio electrónico) .

**Hipótesis de Broglie:** Las partículas pueden comportarse como ondas y viceversa, entonces tienen un momento:  $p = mv = \frac{h\nu}{c}$ . Que se puede expresar en función de la longitud de onda como:

$$\lambda_B = \frac{h}{mv}$$

Cuanto mayor es el momento de una partícula, menor es su longitud de onda.

En la ecuación  $m$  es la masa relativista:

$$m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

**Principio de complementariedad:** Los modelos corpuscular y ondulatorio son complementarios, si una medición prueba el carácter ondulatorio de la materia entonces es imposible probar la naturaleza corpuscular en el mismo experimento y viceversa.



**WERNER HEISENBERG**



[1901-1976]

**PREMIO NOBEL DE**

**FÍSICA 1932**



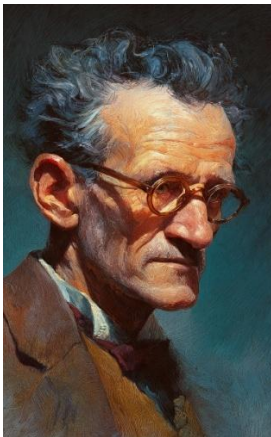
En 1925, desarrolló la primera formulación completa de la mecánica cuántica utilizando el álgebra de matrices, en colaboración con Max Born y Pascual Jordan.

Este enfoque revolucionario (Mecánica Matricial) describió las propiedades físicas de las partículas subatómicas mediante matrices, abandonando las trayectorias orbitales clásicas en favor de un sistema basado en probabilidades y observables (cantidades medibles).

Fue conocido principalmente establecer en 1927 el principio de incertidumbre:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2.$$

Realizó aportes significativos a la teoría del núcleo atómico tras el descubrimiento del neutrón, la hidrodinámica de flujos turbulentos, el ferromagnetismo y los rayos cósmicos.



**ERWIN SCHRÖDINGER**



[1887-1961]

**PREMIO NOBEL DE**

**FÍSICA 1933**

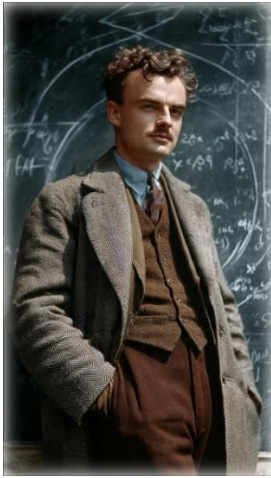


Inspirado por la hipótesis de Louis de Broglie sobre la dualidad onda-partícula de la materia. Schrödinger desarrolló una formulación completa de la mecánica cuántica basada en ondas, que resultó ser matemáticamente equivalente a la mecánica matricial de Werner Heisenberg, pero que ofrecía una visualización más intuitiva para muchos físicos de la época.

Es mundialmente reconocido por la *Ecuación de Schrödinger*: que es una rigurosa descripción matemática de las ondas estacionarias discretas que describen la distribución de los electrones dentro del átomo, mediante una ecuación de difusión para una onda asociada a una partícula:

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V(x, t) \Psi$$

Esta ecuación describe cómo evoluciona el estado cuántico de un sistema físico a lo largo del tiempo.



**PAUL DIRAC**

 [1902-1984]

**PREMIO NOBEL DE  
FÍSICA 1933** 

Ingeniero eléctrico y físico teórico. Reformuló matemáticamente en 1926 las teorías disponibles y les dio la forma de la actual mecánica cuántica. Es considerado uno de los fundadores de la mecánica y la electrodinámica cuánticas.

Famoso por la ecuación de Dirac, que unificó la mecánica cuántica con la teoría de la relatividad especial de Einstein y, predijo la existencia de la antimateria.

Entre otras aportaciones importantes, introdujo una notación matemática elegante y ampliamente utilizada hoy en día para describir los estados cuánticos, conocida como notación *bra-ket*  $\langle\phi|\psi\rangle$ .

*"Un matemático es una máquina para convertir el café en teoremas. "*



**ENRICO FERMI**

 [1901-1954]

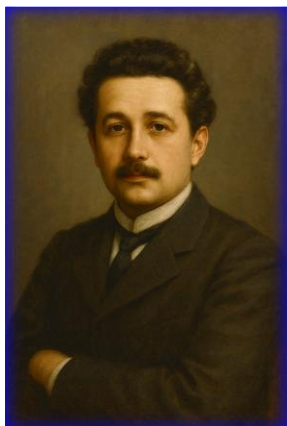
**PREMIO NOBEL DE  
FÍSICA 1938** 

Ingeniero eléctrico y físico teórico. italo-estadounidense, a menudo apodado el "arquitecto de la era nuclear".

Fue uno de los pocos científicos del siglo XX que destacó tanto en la física teórica como en la experimental.

Recibió el Premio Nobel de Física en 1938 por sus trabajos sobre la radiactividad inducida por neutrones.

## ESCRITOS DE EINSTEIN DE 1900 A 1909



ALBERT EINSTEIN



[1879-1955]

*“Einstein, en 1903 a los 23 años, radica en Berna, en donde finalmente ha obtenido el puesto de experto técnico de tercera clase, interino, en la Oficina de Patentes. En 1909 salió de ahí para tomar su puesto de profesor asociado en la Universidad de Zurich, y ya había escrito el trabajo en que propone que la luz tiene naturaleza cuántica y que le valiera el premio Nobel; participado decisivamente en la demostración definitiva de la estructura atómica de la materia, creando la mecánica estadística y la teoría del movimiento browniano; inventado la teoría especial de la relatividad e iniciado la construcción de la teoría general de la relatividad.*

*Además, había descubierto la que probablemente es la más famosa fórmula de la física contemporánea:*

$$E = mc^2$$

*Así como el corrimiento de la luz hacia el rojo y fundando la teoría cuántica de los sólidos.*

*Lleva entre sus papeles su primer doctorado honoris causa y antes de un año sería propuesto por primera vez para el premio Nobel.”*

### LISTA DE TRABAJOS

1. Consecuencias del fenómeno de capilaridad (1900).
2. Sobre la teoría termodinámica de la diferencia de potencial entre metales y sobre un método eléctrico de investigación de las fuerzas moleculares (1902).
3. Teoría cinética del equilibrio térmico y el segundo principio de la termodinámica (1902). Introduce la idea de *conjunto estadístico* (*ensamble*).
4. Teoría de los fundamentos de la termodinámica (1903). Establece la *mecánica estadística*.
5. Sobre la teoría molecular general del calor (1904). Continuación del anterior; se introducen las *fluctuaciones*.

**\*6. Nueva determinación de las dimensiones de la molécula (1905).** Primer trabajo de Einstein sobre el movimiento browniano, en el que aparece la famosa relación de fricción, es decir, el primer *teorema de fluctuación-disipación* conocido. Este trabajo lo presentó Einstein como su [tesis doctoral](#) y es uno de los más citados en la actualidad.

**\*7. Punto de vista heurístico respecto a la creación y transformación de la luz (1905).** Fundamenta la [teoría cuántica de la radiación](#); los resultados se aplican al estudio del efecto fotoeléctrico.

Es especialmente citado al otorgarle a Einstein el premio Nobel en 1921. Es el trabajo más revolucionario de Einstein.

**8. Sobre el movimiento de partículas suspendidas en un líquido en reposo, según la teoría cinético-molecular del calor (1905).** Primer trabajo publicado sobre la teoría del movimiento browniano. Funda la teoría física de [procesos estocásticos](#).

**\*9. Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento (1905).** Nacimiento de la [teoría de la relatividad](#).

**\*10. ¿Depende la inercia de un cuerpo de la energía que contiene? (1905).** Se deriva la fórmula  $E = mc^2$

**11. Sobre la teoría del movimiento browniano (1905).**

**12. "Sobre la teoría de la emisión y absorción de la luz" (1906).**

**13. Ley de conservación del movimiento del centro de masa y de la inercia de la energía (1906).**

**14. Método para determinar la relación entre las masas transversal y longitudinal de un electrón (1906).**

**15. La teoría de la radiación de Planck y la teoría de los calores específicos" (1906).** Con este trabajo Einstein funda la teoría cuántica de los calores específicos; representa el primer tratamiento cuántico del movimiento de las moléculas de un sólido, por lo que con él se funda la [teoría cuántica del estado sólido](#).

**16. Corrección al anterior (1907).**

**17. Sobre los límites de aplicabilidad de un teorema sobre el equilibrio termodinámico y sobre la posibilidad de una nueva determinación de los cuantos elementales (1906).**

**18. Observaciones teóricas sobre el movimiento browniano (1907).**

**19. Sobre la posibilidad de una nueva demostración del principio de relatividad (1907).**

**20. Sobre la nota de P. Ehrenfest Movimiento de translación de electrones deformables y el teorema de las áreas (1907).**

**21. Sobre la inercia de la energía, según demanda el principio de la relatividad" (1907).**

**\*22. Sobre el principio de relatividad y sus consecuencias (1907).** Aquí introduce el principio de equivalencia (*la idea más feliz de mi vida*) y da el primer paso firme hacia la teoría general de la relatividad; descubre la *desviación de la luz por un campo gravitatorio* y el corrimiento hacia el rojo.

**23. Un nuevo método para medir pequeñas cantidades de electricidad (1908).** Einstein propone un *electrómetro* de alta sensibilidad, esperando que con su ayuda se puedan medir las fluctuaciones de la carga eléctrica de un conductor debidas a la agitación térmica. No lo construye por el momento por falta de medios.

**24. Teoría elemental del movimiento browniano (1908).** Trabajo de revisión escrito para químicos por sugerencia de Lorentz, muy citado aún en nuestros días.

**25. Ecuaciones electrodinámicas fundamentales de un cuerpo en movimiento (1908).** En colaboración con J. Laub. Los autores adoptan el método del espacio-tiempo propuesto ese mismo año por Minkowsky.

**26. Sobre las fuerzas ponderomotrices que actúan en el campo electromagnético sobre un cuerpo en reposo (1908).** En colaboración con J. Laub.

**27. Observación sobre el trabajo 25 con J. Laub (1909).**

**28. Observación sobre el trabajo de Misimanoff 'Sobre las ecuaciones fundamentales... (1909).**

**29. Sobre la situación actual del problema de la radiación (1909).**

**30. Sobre la situación actual del problema de la radiación (1909).** Nota en colaboración con W. Ritz para aclarar la diferencia esencial de interpretación de los potenciales retardados entre estos dos autores, la que se puso en evidencia en el trabajo anterior.

**\*31. Sobre el desarrollo de nuestras opiniones respecto a la naturaleza y la estructura de la radiación (1909).** Primer trabajo presentado por Einstein (por invitación) a un congreso (el 81 de la Sociedad Alemana de Naturalistas, realizado en Salzburgo).

Einstein señala la necesidad de usar conceptos corpusculares y ondulatorios a la vez para describir el comportamiento de los sistemas cuánticos (**primera formulación de la dualidad onda-corpúsculo**).

**\*El tamaño de las moléculas:** Einstein, durante el periodo 1902-1904, se planteó el problema de derivar las leyes de la termodinámica como resultado del hecho de que la materia a escala macroscópica está constituida por un gran número de moléculas en agitación térmica.

Debido al inmenso número de partículas involucradas, es imposible hacer una descripción detallada de lo que sucede, por ejemplo, en un gas; pero sí es posible hacer una descripción “mecánico estadística”.

Einstein elaboró una teoría estadística del movimiento browniano y mostró que a partir del seguimiento del movimiento de una de estas partículas bajo “el microscopio” era posible medir el tamaño de las moléculas del solvente.

Presentó varios métodos diferentes para determinar las dimensiones moleculares (en particular, éste es el tema de su tesis doctoral), y el mismo año de 1905 publicó diversas extensiones a su teoría original.

Los resultados de Einstein fueron rápidamente puestos a prueba en varios laboratorios, particularmente en el del físico francés Jean Perrin (1870-1942) y su grupo a partir de 1908, quienes pudieron determinar con los métodos de Einstein las dimensiones moleculares y el número de Avogadro (es decir, el número de moléculas que contiene un mol de un gas en condiciones normales de presión y temperatura).

**\*El efecto fotoeléctrico:** Einstein puso a prueba la hipótesis de Planck. Si la luz tiene una estructura granular, esto debe observarse no sólo en algún caso aislado como el estudiado, sino en multitud de situaciones diferentes.

Pronto encontró un problema no resuelto e ininteligible para la física de su época que había permanecido sin explicación, al menos tanto como el problema del cuerpo negro, y que se resolvía con su hipótesis.

Ciertos materiales, al ser expuestos a la luz, emiten electrones (fenómeno observado y reportado por Hertz durante sus experimentos para producir ondas electromagnéticas). Se observa que aumentando la iluminación —lo que significa dar mayor energía al material— no aumenta la energía de los electrones emitidos, sino sólo su número; asimismo, se encuentra que luz de diferentes colores puede producir efecto fotoeléctrico, pero que para cada material hay un color —o mejor, una frecuencia— de luz abajo de la cual simplemente desaparece el fenómeno. Experimentalmente se encuentra que la frecuencia de corte es característica de cada material.

Si la luz se considera constituida por paquetes de energía de valor  $hf$ ; un átomo absorbe un paquete y se queda con esta energía; parte de ella —o toda, en el mejor de los casos— se transfiere en alguna forma por los mecanismos internos atómicos a uno de los electrones del átomo. El electrón se acelera debido a esta energía y se escapa del átomo; pero como tiene que vencer la atracción del átomo ionizado que abandona, pierde una parte de esta energía, identificada con  $w$ ; luego la máxima energía con que el electrón puede escaparse es:

$$E_{\max} = hf - w \quad [1]$$

Al cambiar la intensidad de la luz, pero sin cambiar el color se observa la misma  $E_{\max}$ , sólo que cuando la luz es más intensa hay más paquetes de energía  $hf$  disponibles y más electrones liberados.

Ahora bien, si se mantiene fija la intensidad y se varía el color de la luz; al llegar a una frecuencia de luz tan baja que  $hf$  adquiera el valor  $w$  o un valor menor, la energía  $E$  de que pueden disponer los electrones se reduce a cero y no puede haber más efecto fotoeléctrico.

Luego existe una frecuencia de corte del fenómeno que está dado por la fórmula:

$$f = w / h \quad [2]$$

Ésta es una fórmula dice que la energía  $w$  y la frecuencia de corte de un fotocátodo dado deben tener un cociente cuyo valor no depende del material que se use para construir el dispositivo y que esta constante es precisamente la de Planck. Luego aquí hay un método novedoso para hacer una determinación no termodinámica de la constante de Planck.

Tuvo que pasar mucho tiempo para que la teoría de los fotones de Einstein alcanzara aceptación general, lo que sucedió alrededor de 1923, gracias en mucho a los trabajos experimentales del físico norteamericano Arthur Compton (1892-1962).

**\*La cuantización de la materia:** Si se consideran los átomos que constituyen la malla de un sólido como pequeños osciladores cuánticos de frecuencia  $f$ , entonces cada uno tendrá una energía  $hf$ . Así que no es cierto que cada oscilador tenga una energía independiente de su frecuencia, como afirmaríala ley clásica de equipartición.

Einstein calculó el calor específico de un sólido usando la fórmula de Planck (que es la que describe osciladores cuánticos) en vez de la de Rayleigh (que es la que describiría osciladores clásicos) y encontró que el resultado depende de la temperatura, aunque a temperaturas suficientemente altas (la temperatura ambiente para la mayoría de los materiales) se recupera el resultado clásico.

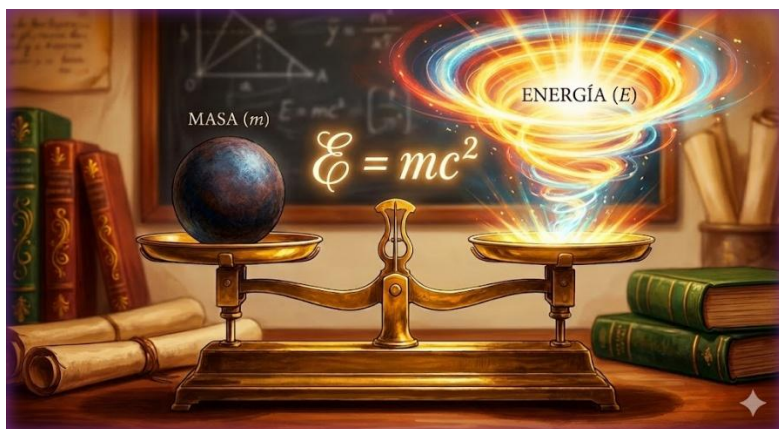
Unos cálculos numéricos sencillos muestran que la curva que da la nueva teoría se ajusta bastante bien a las desviaciones para el diamante y otros elementos. Luego, contrariamente a los que se creía, las desviaciones conocidas de los calores específicos de su valor clásico si apuntaban hacia un problema fundamental: en esos casos no se obedecen las leyes de la física clásica, sino de la física cuántica (la que tendría que construirse).

En 1909 presentó estas ideas como ponencia para el congreso en Salzburgo —que fue el primer congreso en que participó— siendo el primero en señalar que la descripción cuántica tanto de la luz como de las moléculas deberá contener simultáneamente aspectos corpusculares y ondulatorios.

Estos fueron los principios que quince años más tarde se usarían para iniciar el desarrollo de la mecánica cuántica.

**\*Conservación de la Energía:** El espacio-tiempo de cuatro dimensiones. Minkowski hizo ver que en la relatividad lo que tiene sentido profundo es un elemento matemático, el espacio-tiempo que combina las nociones de espacio y de tiempo; cada una de ellas por separado es insuficiente.

En alguna forma esto es análogo a lo que pasa con las dos leyes no relativistas independientes de conservación de la masa y de la energía, que quedan sustituidas por una sola, la conservación de la energía relativista.



## ANEXO FOTOGRÁFICO



**EL JOVEN ALBERT  
EINSTEIN**

"Una rara y cautivadora fotografía de un joven Albert Einstein, mucho antes de convertirse en el físico revolucionario que cambió nuestra comprensión del universo.

Con su característico cabello salvaje y mirada reflexiva, esta imagen captura los primeros años de una mente destinada a redefinir las leyes de la física.

Incluso cuando era joven, la curiosidad y el intelecto rebelde lo separaron, desafiando la sabiduría convencional y sentando las bases de sus teorías innovadoras.

Desde un estudiante luchando hasta el genio detrás de la relatividad, esta fotografía es un vistazo a los años formativos de una de las mayores mentes científicas de la historia, recordándonos que incluso las leyendas tienen comienzos humildes. "



Einstein junto a sus compañeros de clase en el ETH.



Las conferencias Solvay comenzaron en 1911 y la última de ellas tuvo lugar en 2005. La quinta conferencia data de octubre de 1927. Su temática fue ***Electrones y fotones***. En esta reunión podemos encontrar a Albert Einstein, a Niels Bohr o a los padres de la recién nacida Mecánica Cuántica, entre los que podemos destacar a Werner Heisenberg y a Erwin Schrödinger. A ella asistieron 29 científicos, de los cuales 17 habían sido o acabaron siendo premios Nobel.

